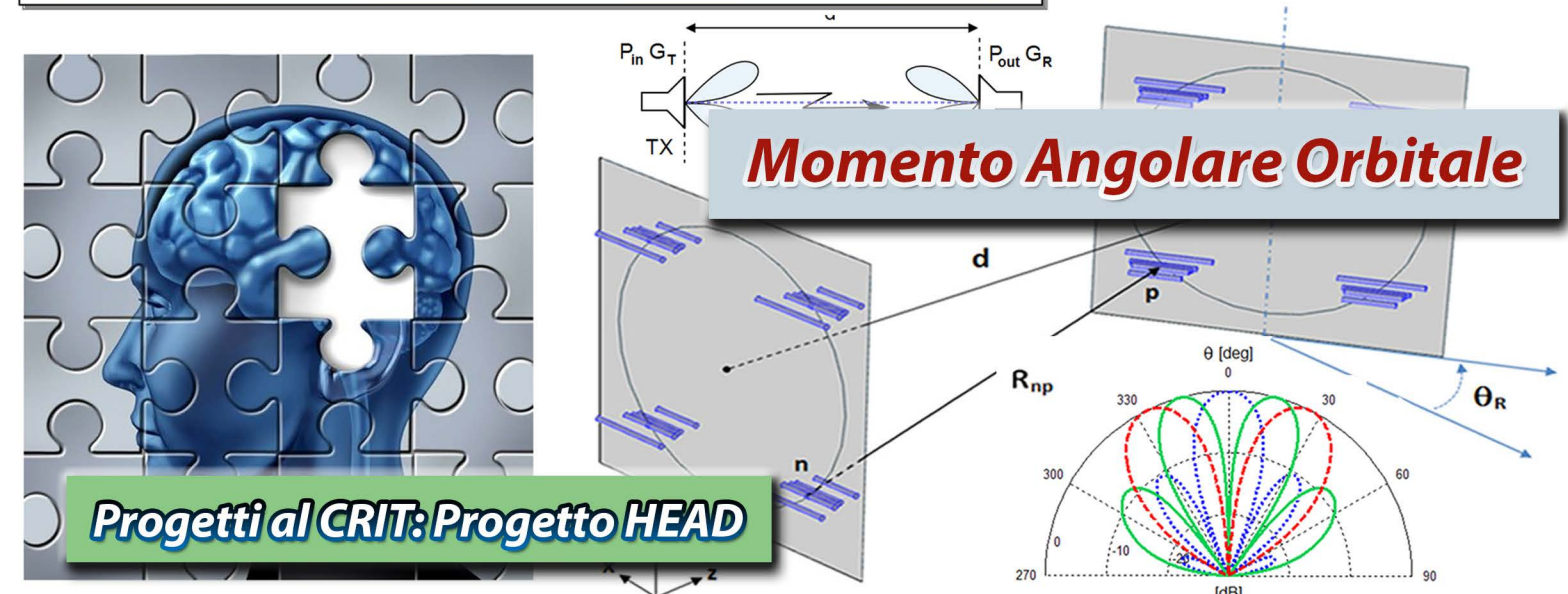
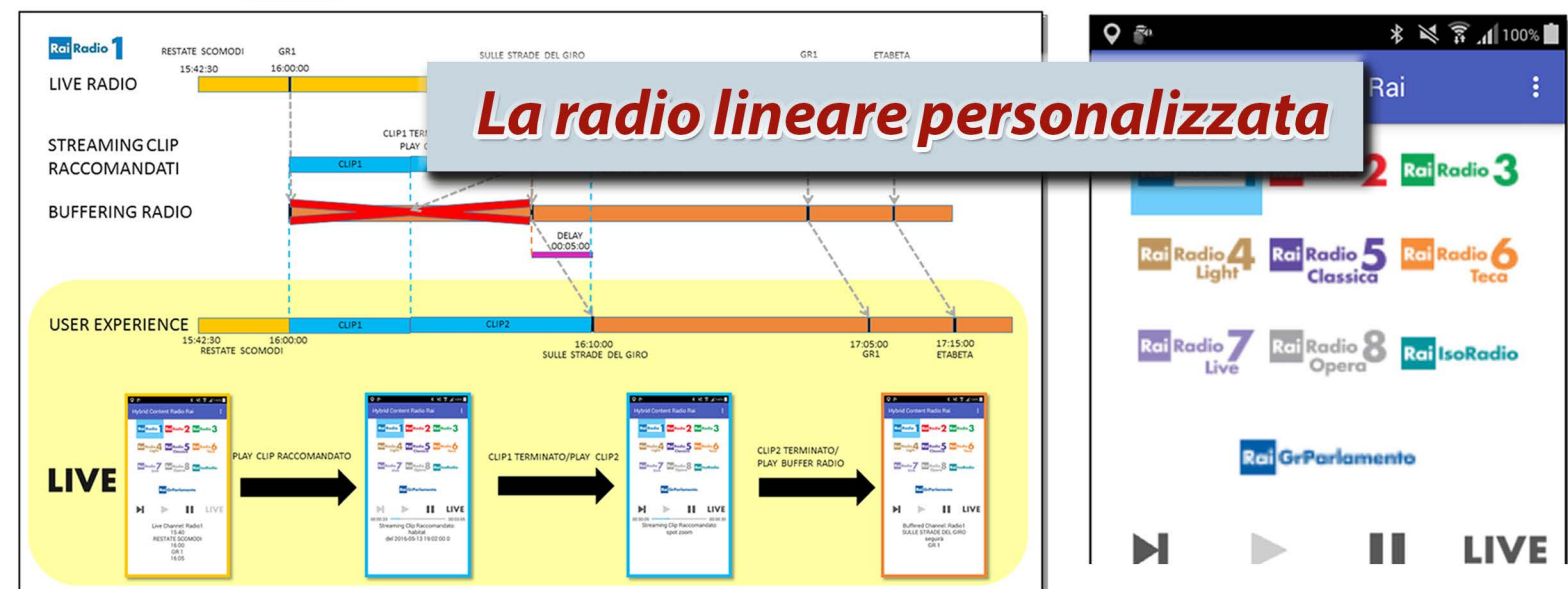
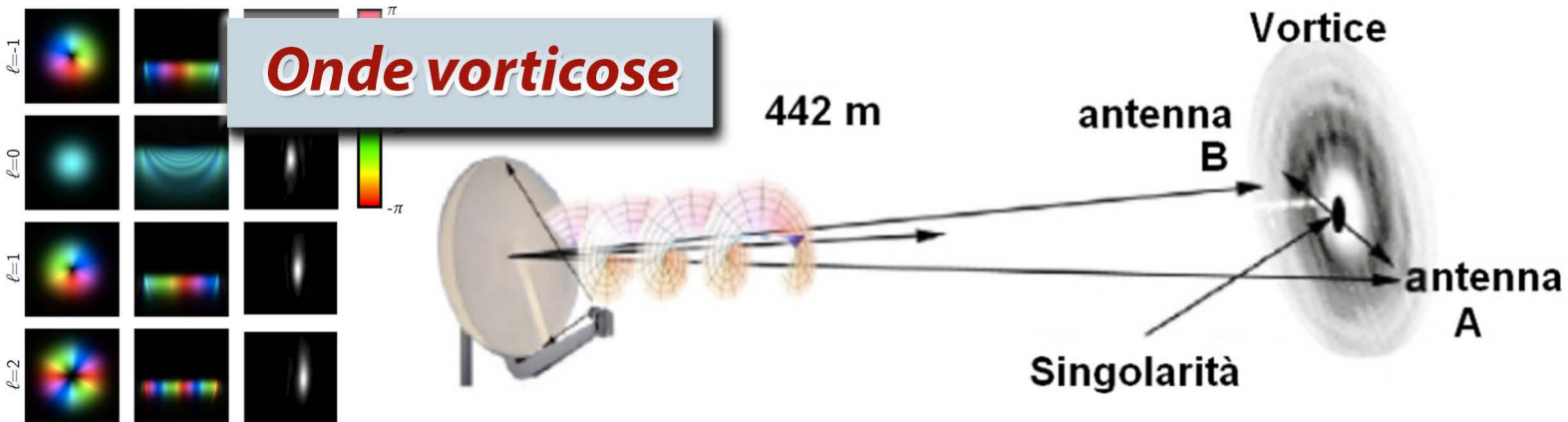
Elettronica e telecomunicazioni

Anno LXV - Numero 1/2016

Onde vorticose

La radio lineare personalizzata

Momento Angolare Orbitale

Progetti al CRIT: Progetto HEAD

La rivista è disponibile su web
alla URL www.crit.rai.it/eletel.htm

Anno LXV
N° 1/2016
Giugno2016

Rivista periodica a cura della Rai

Indice

Editoriale 3
di Gianfranco Barbieri

Onde vorticose una nuova prospettiva per le comunicazioni radio? 5
di Andrea Cagliero, Rossella Gaffoglio, Assunta De Vita e Bruno Sacco

Momento Angolare Orbitale rivisitazione del concetto di Link Budget per un collegamento radio 16
di Andrea Cagliero, Rossella Gaffoglio, Assunta De Vita e Bruno Sacco

La radio lineare personalizzata un nuovo framework per i contenuti radiofonici 22
di Paolo Casagranda, Francesco Russo e Raffaele Tearoni Prioletti

Rubriche
a cura della Redazione

- **Progetti al CRIT** 30
  - ***Progetto HEAD***
- **Notiziario** 32

Editoriale

Gianfranco Barbieri
Direttore di
"Elettronica e Telecomunicazioni"

L'inarrestabile espansione del sistema di telecomunicazioni non accenna a mostrare segnali di rallentamento. Secondo le più aggiornate previsioni, nell'arco dei cinque anni intercorrenti tra il 2015 e il 2020 il numero di utenti Internet crescerà dal 40% al 52% della popolazione, la velocità media dei collegamenti da 24,7 Mbps a 47,7 Mbps ed il traffico medio per utente da 9,9 GB a 25,1 GB al mese. In pratica ciò significa una triplicazione del traffico globale che nel 2020 potrebbe avvicinarsi ai 162 Exabytes al mese (l'equivalente di 41 Miliardi di DVD al mese). Dati altrettanto sorprendenti riguardano la fruizione di contenuti video via Internet; sempre secondo le previsioni, il traffico video potrebbe quasi quadruplicare con una crescita media annua del 30% il che significherebbe raggiungere un valore di 109,5 Exabytes al mese, l'equivalente di 27 Miliardi di DVD al mese (*fonte CISCO*).

In tale contesto si fa impellente l'esigenza di reperire nuove e più avanzate risorse trasmissive che permettano di sfruttare lo spettro elettromagnetico in misura più efficiente. Stanno suscitando un certo interesse nella comunità scientifica alcuni approcci alternativi in cui si sfruttano alcune proprietà fisiche del segnale, quali ad esempio il ***Momento Angolare Orbitale***, una grandezza già utilizzata nel settore dell'ottica; tale applicazione, consente la trasmissione di segnali diversi basandosi sulla diversa ortogonalità del loro stato fisico. Il ***Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai***, da sempre impegnato nello studio di tecnologie innovative per la distribuzione dei programmi di intrattenimento e per l'erogazione di servizi di utilità sociale, ha avviato esperimenti di trasmissione simultanea di due segnali **DVB-T** codificati usando l'approccio dei ***Momenti Angolari Orbitali***. Una ampia descrizione di questa applicazione è riportata nei primi due articoli di questo numero: "*Onde vorticose: una nuova prospettiva per le comunicazioni radio?*" e "*Momento Angolare Orbitale: rivisitazione del concetto di Link Budget per un collegamento radio*".

La radiofonia classica è un servizio che trarrà significativi benefici dalle nuove tecnologie. A fianco del concetto ormai consolidato di *streaming audio via Internet*, si sta facendo strada la prospettiva di un approccio ibrido denominato ***Hybrid Content Radio*** (***HCR***) che costituisce di fatto la *radio lineare personalizzata*. Con questa tecnica la tradizionale trasmissione lineare costituisce il fulcro attorno al quale viene costruito un nuovo servizio che può avvalersi dei contenuti audio di arricchimento, forniti, ad esempio, dagli archivi dell'emittente. In pratica, ***HCR*** favorisce l'arricchimento del palinsesto lineare dell'emittente personalizzando l'ascolto sul profilo, lo stato emotivo e la formazione culturale dell'utente.

Il sistema è in via di sperimentazione da parte di alcuni radiodiffusori europei; l'articolo: "*La radio lineare personalizzata - un nuovo framework per i*

contenuti radiofonici " fornisce una descrizione del sistema e offre una panoramica dei servizi sperimentali proposti.

Tra le attività mirate ai servizi di utilità sociale riveste particolare importanza il progetto ***HEAD*** (***Human Empowerment Aging and Disability***) che impegna il ***Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai*** con la ***Fondazione ASPHI*** e vede coinvolti, sul fronte clinico, l'***Ospedale Valduce–Villa Beretta***, la F***ondazione Opera San Camillo–Presidio Sanitario San Camillo di Torino*** e la ***Fondazione Don Carlo Gnocchi di Milano***. Obiettivo del progetto è quello di realizzare un'infrastruttura tecnologica che supporti un modello di riabilitazione a domicilio innovativo che risponda alle necessità di complessità e continuità di cura a domicilio di persone con disabilità motorie e cognitive. Le linee guida del progetto sono descritte nella rubrica *Progetti al CRIT*. Per la fruizione dei contenuti televisivi sono impiegate nel progetto le tecnologie ***Stretch & Easy TV*** sviluppate dal ***Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai***.

Onde vorticose:

una nuova prospettiva per le comunicazioni radio?

Andrea **Cagliero**[1], Rossella **Gaffoglio**[1], Assunta **De Vita**[2], Bruno **Sacco**[2]
[1]**Università di Torino** - Dipartimento di Fisica
[2]**Rai** - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Tra le possibili tecniche che consentono un uso efficiente dello spettro elettromagnetico, particolare attenzione ha suscitato negli ultimi anni il tentativo di sfruttare il momento angolare orbitale (OAM) della radiazione elettromagnetica, una grandezza fisica che agisce a livello dei singoli fotoni e non dipende dalla polarizzazione del fascio, bensì dalla sua distribuzione spaziale. Quest'ultima proprietà permette, in linea di principio, di trasmettere e ricevere, alla medesima frequenza portante, un insieme elevato di canali indipendenti, con un conseguente incremento della capacità di trasmissione. Tale prospettiva ha suscitato l'attenzione di diversi gruppi di ricerca, portando alla realizzazione di alcuni importanti esperimenti sia nell'ambito delle radiocomunicazioni che in quello dell'ottica, dove sono stati recentemente elaborati sistemi in grado di codificare e distinguere canali OAM in spazio libero. Nonostante l'esito positivo di questi esperimenti, esistono visioni divergenti sull'argomento ed è tuttora in corso un dibattito scientifico volto a stabilire l'effettivo grado di innovazione dell'OAM nel contesto delle telecomunicazioni rispetto alle tecnologie preesistenti.

Il presente articolo si propone di offrire una panoramica sullo stato attuale degli studi condotti in letteratura, con un excursus sulle tecniche che permettono la generazione dei fasci OAM. Viene inoltre fornita una breve descrizione dei primi esperimenti condotti nel campo delle frequenze radio e delle diverse interpretazioni sui possibili vantaggi legati all'impiego di questi fasci. Infine, sono presentati alcuni ulteriori campi di applicazione dell'OAM, che spaziano dalle nanotecnologie alla fisica quantistica.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, a seguito della crescente diffusione di servizi a banda larga, si è assistito ad un forte aumento della richiesta di risorse spettrali da parte dei sistemi di comunicazione wireless. La quantità di traffico dati, infatti, raddoppia ogni anno e le previsioni annunciano che sulle reti mobili questo traffico crescerà di circa tredici volte nei prossimi cinque anni [1].

Per far fronte a questo problema, l'evoluzione tecnologica delle telecomunicazioni è indirizzata continuamente allo sviluppo di nuove tecniche che permettano di sfruttare lo spettro elettromagnetico in maniera sempre più efficiente. Tra i possibili approcci alternativi di trasmissione dell'informazione si annoverano, ad esempio, quelli che impiegano diversi schemi di modulazione, tecniche di polarizzazione e di multiplazione o quelli che sfruttano la diversità spaziale/temporale quali, ad esempio, i sistemi **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*).

Oltre alle tecniche sopra citate, recentemente sono stati proposti nuovi metodi, basati sulle proprietà fisiche del segnale e riguardanti la cosiddetta *diversità topologica*. Tale approccio prevede che i segnali siano trasmessi usando diversi stati ortogonali del ***Momento Angolare Orbitale*** (in inglese *Orbital Angular Momentum*, **OAM**), una grandezza fisica, già nota da tempo nell'ottica, che solo di recente è stata considerata per applicazioni nel campo delle radiofrequenze. L'idea è quella di utilizzare la

Onde vorticose: una nuova prospettiva?

caratteristica distribuzione spaziale di fase di ciascuno di questi stati per trasmettere e ricevere, alla medesima frequenza, un insieme elevato di canali indipendenti, con un conseguente incremento della capacità di trasmissione. Oltre ai regimi dell'ottica e delle radiofrequenze, l'**OAM** ha trovato recentemente applicazioni pratiche in molti altri campi quali i sistemi radar, le nanotecnologie, la fisica quantistica e l'astronomia.

2. Il Momento Angolare Orbitale (OAM)

Un'onda elettromagnetica trasporta energia e momento lineare nella direzione del versore ortogonale ai fronti d'onda; com'è noto, il momento lineare è responsabile della pressione di radiazione che si misura su una superficie investita dall'onda. In generale, la radiazione elettromagnetica può anche trasportare momento angolare e questa grandezza comprende due contributi differenti: il *momento angolare di spin* (**SAM**) e il *momento angolare orbitale* (**OAM**). Mentre nel primo caso il momento angolare è associato alla polarizzazione circolare del fascio, nel secondo caso è legato ad una distribuzione elicoidale dei fronti d'onda tipica di particolari modi elettromagnetici noti come ***onde vorticose*** o, semplicemente, **OAM**.

Associato a tali fasci è il fattore di fase del campo elettromagnetico $e^{i\ell\varphi}$, dove φ è l'angolo azimutale attorno all'asse del fascio, mentre ℓ è un indice caratteristico che può assumere qualsiasi valore intero ed è legato al contenuto di momento angolare orbitale. Fu solo nel 1992 che Allen e altri [2] dimostrarono matematicamente tali proprietà e suggerirono come si possano generare fasci laser con fase elicoidale convertendo i modi di *Hermite-Gauss*, ampiamente utilizzati in ottica, in modi di *Laguerre-Gauss*. In figura 1 sono riportati i fronti d'onda e i profili di intensità relativi a fasci **OAM** con diverso indice azimutale ℓ. Il caso particolare $\ell = 0$ è quello relativo alla radiazione convenzionale.

Negli ultimi anni si è assistito ad un progressivo incremento delle applicazioni **OAM**, che spaziano dalla possibilità di intrappolare e mettere in rotazione particelle microscopiche [2] [3] fino alle nuove proposte per la crittografia e la codifica quantistica dell'informazione [4] [5]. In astronomia l'**OAM** ha permesso di migliorare il potere risolutivo degli strumenti ottici, agevolando gli studi sulla materia interstellare e sui buchi neri di Kerr [6]. Dal punto di vista delle trasmissioni ottiche in spazio aperto, sono stati recentemente elaborati sistemi in grado di codificare e distinguere un elevato numero di canali **OAM** [7] [8] [9] e dagli ultimi studi sembra emergere anche la possibilità di una trasmissione **OAM** in fibra ottica per applicazioni quantistiche [10] [11].

Fig. 1 – Fronti d'onda (a) e rispettivi profili di intensità (b) e fase (c) per diversi indici di vorticosità

3. Tecniche per la generazione di fasci OAM

Esistono numerosi metodi per produrre fasci **OAM** alle varie frequenze. Nel dominio dell'ottica, la strategia più semplice consiste nell'impiego degli *Spiral Phase Plates* (**SPP**) (figura 2 sinistra), elementi ottici sagomati in modo da imprimere una distribuzione di fase elicoidale al fascio gaussiano che li attraversa. Poiché la radiazione elettromagnetica impiega più tempo a percorrere una determinata distanza in un mezzo otticamente denso piuttosto che nel vuoto, è possibile modificare la fase dell'onda attraverso una variazione dello spessore del materiale utilizzato. Un'altra strategia risiede nell'impiego di *ologrammi* generati al computer, che si basano sul calcolo del profilo di interferenza tra il fascio **OAM** desiderato e un'onda gaussiana di riferimento. La figura ottenuta, stampata su un ologramma ad alta risoluzione, viene successivamente illuminata con il fascio gaussiano fondamentale ricavando un profilo di diffrazione il cui primo ordine corrisponde alla configurazione cercata, secondo i principi dell'olografia (figura 2 destra). Lo svantaggio di questa seconda procedura consiste nella notevole perdita di potenza, dovuta al fatto che soltanto una frazione dell'intensità iniziale raggiunge il primo ordine di diffrazione.

Come anticipato nella sezione precedente, in ottica esiste anche la possibilità di generare fasci di *Laguerre-Gauss* combinando fasci di *Hermite-Gauss* mediante opportune lenti cilindriche (figura 3).

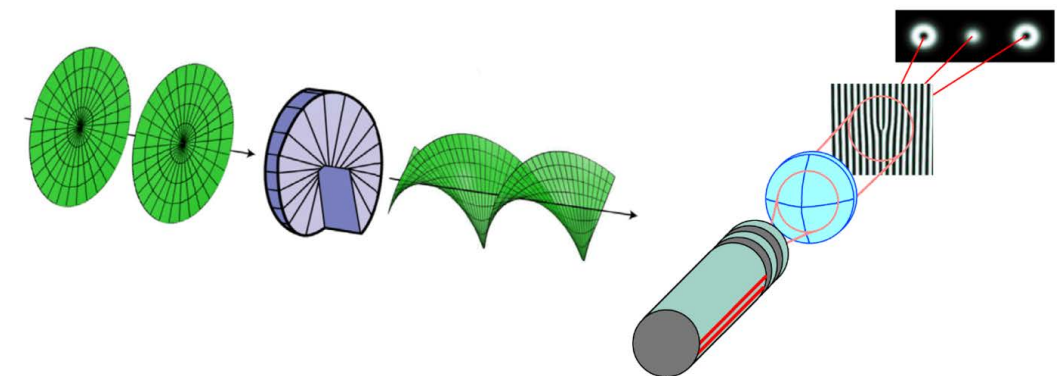



Fig. 2 – Luce non vorticosa acquista OAM attraversando una SPP (sinistra) o un ologramma (destra) [3] [12]

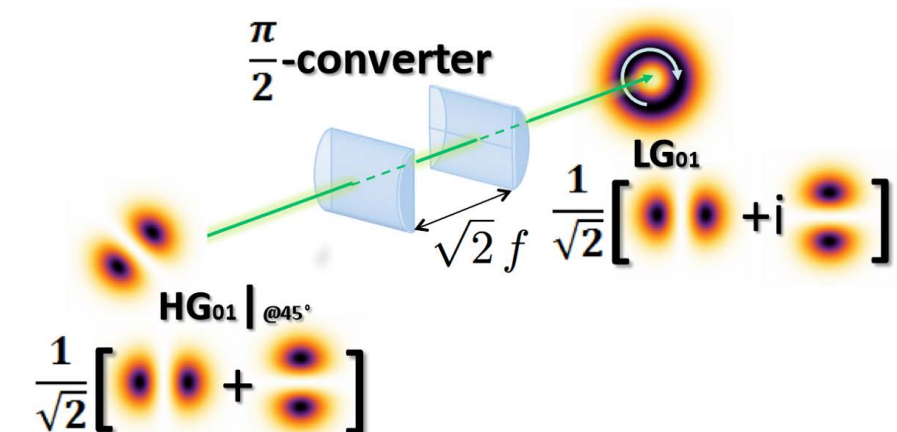
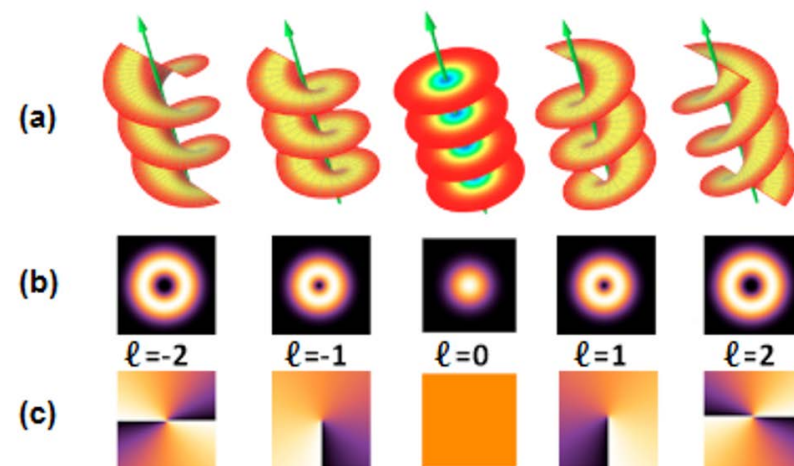



Fig. 3 – Generazione di un modo Laguerre-Gauss come sovrapposizione di modi Hermite-Gauss mediante lenti cilindriche

Nel regime delle frequenze radio, la produzione di fasci **OAM** è stata sperimentata secondo metodologie in larga parte ereditate dall'ottica: anche in questo caso sono impiegati *ologrammi*, che consistono in film dielettrici su cui sono applicate strisce metalliche disposte secondo il profilo di interferenza calcolato, o maschere dielettriche sagomate. Inoltre, è possibile sfruttare le cosiddette *flat phase plates*, superfici piane sfasanti con permittività variabile [13]. Queste ultime sono state concepite con un criterio simile a quello su cui si basano le **SPP**, poiché anche in questo caso l'onda è soggetta ad un ritardo di fase durante la trasmissione attraverso il mezzo, con la differenza che lo sfasamento introdotto è dovuto alla variazione angolare della permittività (figura 4, sinistra). Inoltre, in alcuni recenti esperimenti sono state trasmesse onde radio **OAM** generate da un'antenna parabolica il cui riflettore è stato modificato opportunamente per imprimere la vorticità richiesta (figura 4, destra) [14].

Una valida alternativa ai metodi descritti sopra consiste nel sintetizzare onde radio **OAM** per mezzo di schiere di antenne, vale a dire strutture composte da un certo numero di sorgenti alimentate in modo da riprodurre, a grandi distanze, un preciso profilo di irradiazione. Le sorgenti possono essere dipoli od antenne più complesse e la loro disposizione geometrica, insieme alla scelta delle correnti di alimentazione, determina le caratteristiche del campo complessivo prodotto, quali ad esempio la polarizzazione e la distribuzione dell'energia. Nello specifico, il fronte d'onda elicoidale di un fascio **OAM** può essere generato approssimativamente da una configurazione di *N* radiatori identici, collocati in maniera equidistante su una circonferenza ed alimentati con un segnale d'ingresso con la medesima ampiezza e sfasamento elettrico pari a $\ell\varphi_n$, dove φ_n indica la posizione angolare dell'*n*-esima antenna (figura 5) [16].

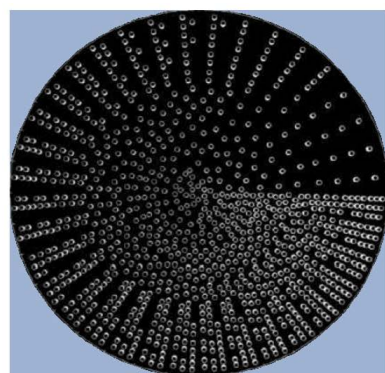
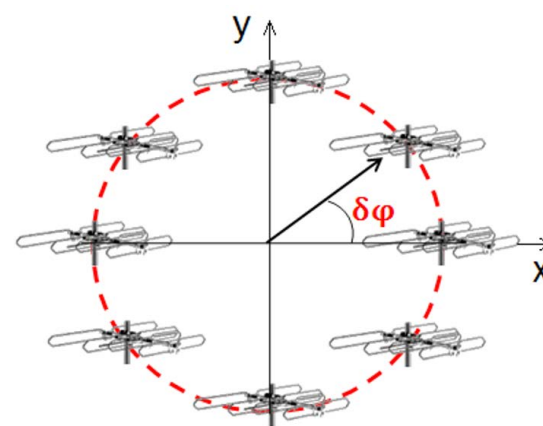



Fig. 4 – Micro-phorated *flat phase plate* (sinistra) [12] e antenna parabolica *twistata* (destra) [15]

Fig. 5 – Schiera circolare di antenne con N=8, dove δφ=2πℓ/N

4. Il Momento Angolare Orbitale alle frequenze radio

4.1 Gli esperimenti di Venezia e Milano

L'idea di sfruttare la diversità topologica dei fasci **OAM** nell'ambito delle comunicazioni radio è stata proposta per la prima volta dagli astrofisici Bo Thidé [17] e Fabrizio Tamburini [15] e si è concretizzata nell'esperimento pubblico "*Onde sulle Onde*", realizzato dagli stessi e dai loro collaboratori il 24 giugno 2011 a Venezia. Lo scopo di questo esperimento è stato quello di dimostrare la possibilità di utilizzare due fasci di onde radio incoerenti, trasmessi ad una stessa frequenza di 2.414 GHz e codificati nei due diversi stati **OAM** $\ell = 0$ e $\ell = 1$ per trasmettere simultaneamente due canali radio indipendenti. Il fascio $\ell = 0$ è stato generato da un'ordinaria antenna Yagi-Uda (figura 6a), mentre il fascio vorticoso con indice $\ell = 1$ ha avuto origine da una parabola *twistata* come quella descritta nel precedente paragrafo (figura 6b).

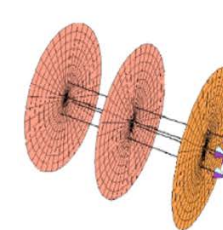
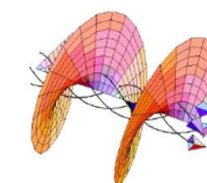
In una prima fase dell'esperimento, la distribuzione di intensità del fascio vorticoso è stata mappata ad una distanza di 40 m dalla parabola twistata rilevando la presenza di una regione centrale di minimo. L'utilizzo di un opportuno interferometro ha permesso inoltre di verificare una variazione di fase pari a 2π in un piano ortogonale alla direzione di propagazione, intorno alla singolarità centrale, confermando così come i fasci **OAM** preservino la loro struttura vorticosa con la distanza. Successivamente, i due fasci con indici $\ell = 0$ e $\ell = 1$ sono stati modulati in frequenza da due segnali audio indipendenti e trasmessi alla distanza di 442 m dalle sorgenti. Alla ricezione, come illustrato in figura 7, un interferometro di fase costituito da due antenne Yagi-Uda poste ad una distanza reciproca di 4.5 m ha permesso di discriminare i due segnali sfruttando i diversi pattern di fase delle rispettive portanti. Combinando in fase i segnali ricevuti è stato infatti possibile ottenere un'interferenza costruttiva per il caso $\ell = 0$ e distruttiva per il caso $\ell = 1$, mentre una combinazione in controfase ha portato ad un isolamento del segnale audio associato al fascio $\ell = 1$.

(a) (b)

Fig. 6 – **(a)** Fascio con OAM ℓ = 0 (antenna Yagi-Uda); **(b)** Fascio con OAM ℓ = 1 (parabola twistata) [15]

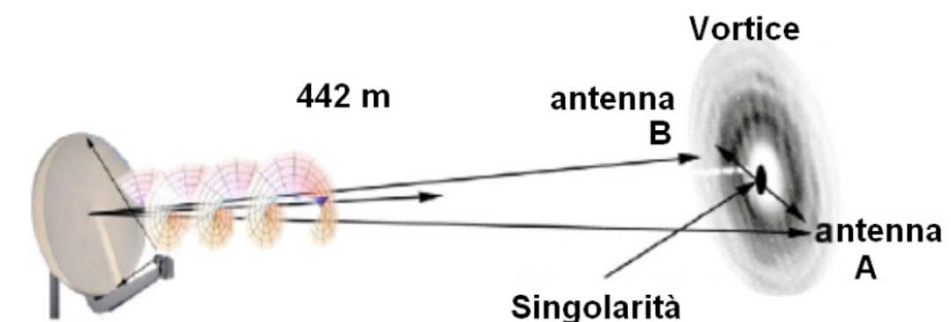



Fig. 7 – Trasmissione e ricezione di un fascio OAM con indice ℓ = 1 nell'esperimento di Venezia [15]

In un successivo esperimento [18], svolto a Milano nel 2013, Tamburini e il suo gruppo hanno implementato una tecnica di multiplexing e demultiplexing su tre fasci **OAM** con indice $\ell = 1, 0, -1$, polarizzati linearmente e trasmessi alla frequenza di 17 GHz. I fasci sono stati generati e rilevati da parabole twistate di indice ℓ con un diametro di 36 cm e la distanza di link è stata fissata a 100 m, valore di molto superiore alla soglia di far-field relativa al sistema considerato (vedi figura 8). L'esperimento ha permesso di mettere in luce alcuni aspetti fondamentali legati alla trasmissione di fasci vorticosi. Ogni fascio **OAM** con indice ℓ è ricevuto correttamente da una parabola twistata avente lo stesso indice, posta perpendicolarmente alla direzione di propagazione e centrata rispetto ad essa, in quanto solo in questo caso, in virtù dell'ortogonalità dei modi **OAM**, l'antenna è in grado di compensare gli sfasamenti dell'onda incidente e di respingere radiazione con vorticosità diversa da ℓ proveniente dalla stessa direzione. Se da un lato è stato pertanto necessario massimizzare l'ortogonalità dei modi **OAM**, garantendo l'allineamento tra i sistemi trasmittente e ricevente, dall'altro la presenza di diverse antenne in ricezione ha comportato la necessità di assicurare un adeguato isolamento modale, modificando il puntamento dei singoli trasmettitori in modo tale da sfruttare i diversi pattern di radiazione (si veda l'inclinazione delle parabole twistate in figura 8).

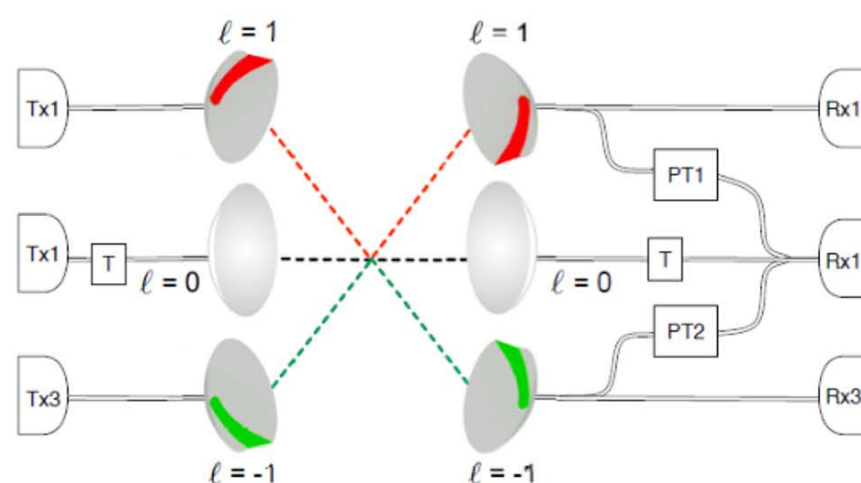



Fig. 8 – Trasmissione e ricezione di fasci OAM nell'esperimento di Milano

Onde vorticose: una nuova prospettiva?

4.2 Visioni divergenti sull'impiego dell'OAM alle radiofrequenze

Da un punto di vista fisico, la possibilità di sfruttare il momento angolare orbitale della radiazione elettromagnetica per trasmettere simultaneamente più canali radio alla stessa frequenza si presenta come un metodo del tutto nuovo rispetto alle tecniche precedentemente utilizzate per incrementare la capacità di informazione per unità di banda. Nonostante questo, gli esperimenti di Tamburini hanno innescato un acceso dibattito nel mondo scientifico volto a stabilire l'effettivo grado di innovazione del metodo proposto rispetto alle tecnologie preesistenti e ad evidenziarne i limiti pratici di applicabilità. In [19], Tamagnone et al. affermano come l'esperimento di Venezia sia riconducibile ad un particolare tipo di trasmissione **MIMO**, in cui la discriminazione dei segnali alla ricezione si basa sulle differenze nei pattern di fase che caratterizzano fasci **OAM** trasmessi collinearmente con diverso indice azimutale ℓ. Nei sistemi **MIMO** in condizioni di far-field, ovvero a distanze che superano il range di Fraunhofer per il caso in esame, soltanto un segnale può essere trasmesso con successo nell'ipotesi di polarizzazione lineare. Questo comportamento si ritrova nelle trasmissioni di tipo **OAM**, in cui, mantenendo costante la dimensione dell'interferometro di fase, come nell'esperimento di Tamburini, all'aumentare della distanza z dalle sorgenti l'intensità dei segnali ricevuti subisce un'attenuazione proporzionale a $z^{-2\ell-2}$, favorendo un'adeguata ricezione del solo modo $\ell = 0$ [20]. Alla luce di queste considerazioni, Tamagnone giustifica l'esito positivo dell'esperimento di Venezia sottolineando come la separazione spaziale tra i sistemi trasmittente e ricevente fosse effettivamente solo di poco superiore alla soglia di far-field. Valutazioni analoghe sull'impiego dei fasci **OAM** nel campo delle radiocomunicazioni sono riscontrabili in [21]. In tale articolo gli autori mostrano esplicitamente come i modi fondamentali relativi ad una trasmissione **MIMO** tra schiere circolari di antenne isotropiche corrispondano esattamente ai fasci **OAM**. Per questa ragione, a loro parere, metodi di discriminazione dei segnali radio basati sul momento angolare orbitale si riconducono, sotto particolari condizioni, ad un sottoinsieme delle possibilità offerte dalle tecniche **MIMO**, non offrendo dunque ulteriori vantaggi in termini di capacità. In risposta a tali considerazioni critiche, gli autori di [22] sottolineano come l'originalità dell'esperimento di Venezia risieda nell'idea stessa di sfruttare l'**OAM**, quantità fisica diversa dal momento lineare e dallo spin, sui quali si basano essenzialmente le tecniche **MIMO** di trasmissione/ricezione. In effetti, la diversità topologica dei fasci vorticosi e la relazione di ortogonalità che li caratterizza potrebbero condurre a semplificazioni tecnologiche nei metodi di codifica/decodifica, oltre che all'individuazione di particolari contesti di applicazione in cui un metodo di distinzione dei segnali ricevuti basato sull'**OAM** sia preferibile alle tecniche preesistenti. Infine è auspicabile che si continui ad approfondire lo studio dei fasci vorticosi dal punto di vista sperimentale, in modo da stabilire con precisione quali siano le massime distanze entro cui sia possibile usufruirne compatibilmente con i limiti dell'odierna tecnologia.

5. Comunicazioni in near-field

Sebbene le onde vorticose siano caratterizzate da un'intensità che si attenua maggiormente con la distanza nella regione centrale rispetto alla radiazione ordinaria, nelle applicazioni di near-field tale problematica non è rilevante e pertanto i fasci OAM potrebbero rappresentare un modo alternativo per aumentare la capacità del canale e, come già precedentemente accennato, semplificare le operazioni di elaborazione del segnale (*signal processing*) in virtù della loro naturale ortogonalità [23] [24]. In particolare, i modi OAM potrebbero essere impiegati per realizzare trasferimenti dati con un'elevata capacità in applicazioni wireless LAN per tipico uso indoor, utilizzando opportune tecniche adattative di codifica/decodifica.

Nonostante questo, è importante precisare come la possibilità di sfruttare l'ortogonalità dei fasci vorticosi per discriminare i segnali ricevuti risulti essere molto sensibile ad eventuali disallineamenti tra i sistemi trasmittente e ricevente, che devono essere disposti uno di fronte all'altro, perpendico-

larmente alla direzione di propagazione. Per questa ragione, piccoli spostamenti rispetto alla direzione di puntamento ottimale si riflettono pesantemente sull'efficienza di comunicazione del link considerato. Tuttavia, questa caratteristica apparentemente negativa può risultare particolarmente interessante per altre applicazioni in cui è di fondamentale importanza che l'informazione scambiata non venga intercettata da parti terze, come la condivisione di dati personali, i pagamenti elettronici, ecc., migliorando quindi la sicurezza già a livello fisico a prescindere da ulteriori protocolli di sicurezza di più alto livello, come le chiavi crittografiche e i sistemi di autorizzazione [25].

6. Ulteriori applicazioni

L'interesse per la radiazione elettromagnetica **OAM** sta raggiungendo in questi anni livelli inattesi, soprattutto in ottica.

Uno dei risultati più importanti è consistito nella verifica del trasferimento di momento angolare orbitale tra luce e materia, che ha aperto la strada all'impiego dei fasci vorticosi come utili strumenti per la micromanipolazione (figura 9).

Per quanto concerne la questione della decodifica dei fasci **OAM** nelle comunicazioni ottiche in spazio libero, sono stati recentemente elaborati vantaggiosi sistemi, gli *OAM-sorters*, che permettono l'ordinamento di svariati fasci **OAM** [27] e stanno ormai soppiantando i precedenti apparati che consistevano in sofisticate catene di interferometri ed ologrammi di difficile realizzazione e limitato guadagno. Un *OAM-sorter* consiste in un apparato ottico che effettua una mappa logaritmico-polare trasformando modi azimutali in onde piane inclinate successivamente focalizzate in differenti posizioni laterali (figura 10).

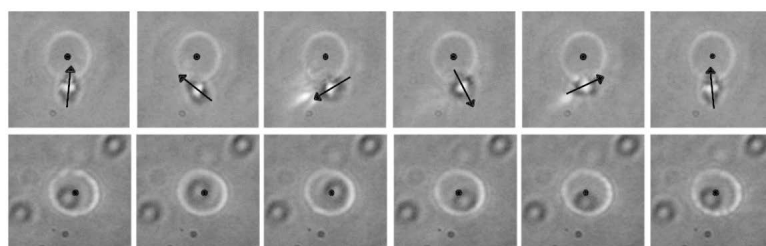



Fig. 9 – Fotografie successive che dimostrano il trasferimento di momento angolare tra luce laser e microparticelle. Nella prima sequenza una particella è messa in rotazione intorno al proprio asse per trasferimento di SAM; nella seconda sequenza, la particella è intrappolata nella regione centrale di un fascio OAM e percorre un'orbita circolare sotto l'azione del vortice [26]

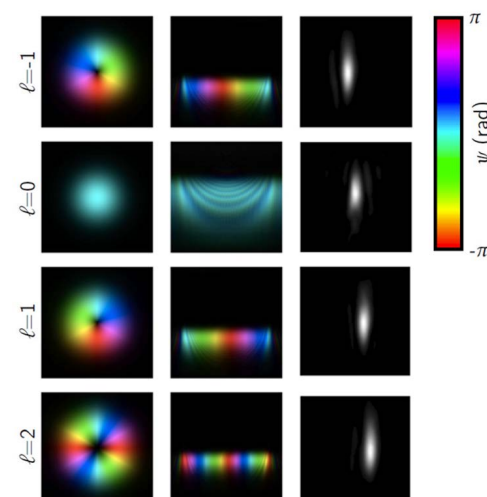
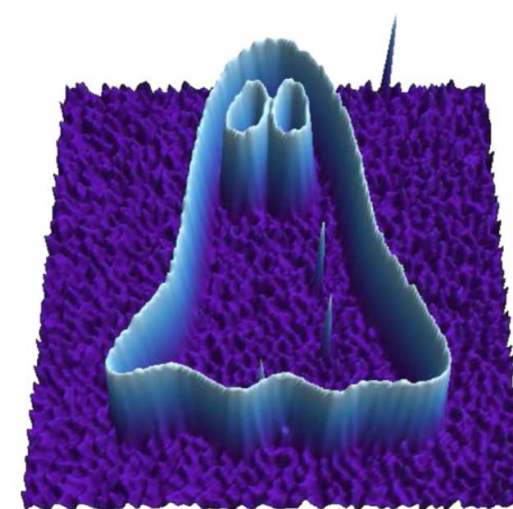
Fig. 10 – Rappresentazione schematica del principio di funzionamento di un OAM-sorter: mediante uso di opportuni dispositivi ottici, i fasci OAM (prima colonna) vengono trasformati in onde piane inclinate (seconda colonna) che sono successivamente focalizzate in posizioni laterali differenti (terza colonna) [27]

Una delle principali ragioni alla base del notevole interesse suscitato dai fasci **OAM** consiste nella possibilità di utilizzarli negli esperimenti di ottica quantistica. Mediante il processo di *parametric downconversion*, un fotone ad alta frequenza attraversa un materiale non lineare generando due fotoni a bassa frequenza. La *parametric downconversion* gioca un ruolo fondamentale negli esperimenti quantistici poiché permette di fornire in uscita due stati che sono tra di loro coerenti (*entangled*) e possono pertanto essere impiegati per la crittografia e la codifica quantistica dell'informazione. I due fotoni in uscita sono prodotti mediante un processo che conserva energia, impulso e momento angolare, pertanto la misura di una di queste quantità per uno dei due fotoni consente di avere diretto accesso alla stessa quantità per l'altro fotone, anche quando i due fotoni sono molto distanti tra di loro. Il vantaggio di utilizzare l'**OAM** a questo proposito risiede nel fatto che ad esso è associato uno spazio degli stati ad alta dimensionalità, che permette di veicolare molta più informazione rispetto al comune impiego della sola polarizzazione (**SAM**) [12]. Per la stessa ragione, l'**OAM** può essere utilizzato nell'*imaging quantistico* [28], un processo che sfrutta la proprietà dell'*entanglement* per fornire immagini dell'oggetto target con risoluzione superiore a quella raggiungibile con l'ottica classica (figura 11).

Fig. 11 – Un esempio di imaging mediante l'impiego di OAM: le misure di coincidenza tra due fotoni entangled in OAM, uno dei quali è fatto interagire con l'oggetto target, sono utilizzate per ricostruire l'immagine [28]

7. Conclusioni

L'implementazione di tecniche volte a produrre fasci elettromagnetici con diverso indice di vorticosità ha portato alla realizzazione di una serie di esperimenti nell'ambito dell'ottica, che spaziano dalle applicazioni quantistiche alla manipolazione di micro particelle, aprendo così la strada a nuove prospettive tecnologiche.

Recentemente l'impiego dei fasci **OAM** è stato esteso anche alle comunicazioni radio in spazio libero, dove, tuttavia, ha dato origine a varie discussioni sull'effettiva possibilità di superare alcuni aspetti critici, quali la sensibilità al disallineamento tra le antenne trasmittenti e riceventi e l'attenuazione nelle trasmissioni in campo lontano. Ulteriori indagini sui potenziali vantaggi e sui limiti di applicabilità relativi a questo tipo di fasci risultano a nostro avviso doverose e sono già state in parte sviluppate in un esperimento da noi realizzato presso il **Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai**, che sarà presentato in un numero successivo di questa rivista. In tale esperimento viene provata la trasmissione simultanea di due segnali DVB-T codificati come modi **OAM** $\ell = 1$ e $\ell = -1$, realizzata mediante l'utilizzo di schiere circolari uniformi di antenne, ad una distanza più di tre volte superiore alla soglia di far-field. A differenza dell'esperimento di Milano [18], i fasci **OAM** sono stati trasmessi collinearmente in modo da sfruttare al meglio la loro intrinseca ortogonalità sull'asse di propagazione. Si rimandano comunque ad un prossimo articolo i dettagli e i risultati di tale esperimento.

Onde vorticose: una nuova prospettiva?

Bibliografia

[1] Fonte Cisco: http://www.cisco.com (ultimo accesso 10 giugno 2015)

[2] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw e J. P. Woerdman, *Optical angular momentum of light and the transformation of Laguerre Gauss laser modes*, in "Physical Review A", vol. 45,1992, pp. 8185–8189.

[3] M. J. Padgett e L. Allen, *Light with a twist in its tail*, in "Contemporary Physics", vol. 41, Issue 5, 2000, pp. 275-285.

[4] G. Molina-Terriz, J. P. Torres e L. Torner, *Management of the Angular Momentum of Light: Preparation of Photons in Multidimensional Vector States of Angular Momentum*, in "Physical Review Letters", vol. 88, 013601, 2001.

[5] A. Vaziri, G. Weihs e A. Zeilinger, *Superpositions of the orbital angular momentum for applications in quantum experiments*", in "Journal of Optics B: Quantum Semiclassical Optics", vol. 4, Numero 2, 2002, pp. S47-S51.

[6] G. Anzolin, F. Tamburini, A. Bianchini, G. Umbriaco e C. Barbieri, *Optical vortices with starlight*, in "Astronomy and Astrophysics", vol. 488, Numero 3, 2008, pp.1159-1165.

[7] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett et al., *Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum*, in "Optics Express", vol. 12, Issue 22, 2004, pp. 5448-5456.

[8] M. P. J. Lavery, D. J. Robertson, A. Sponselli et al., *Efficient measurements of an optical orbital-angular-momentum spectrum comprising more than 50 states*, in "New Journal of Physics", vol. 15, gennaio 2013.

[9] A. Dudley, T. Mhlanga, M. Lavery et al., *Efficient sorting of Bessel beams*, in "Optics Express", vol. 21, Issue 1, 2013, pp. 165-171.

[10] N. Bozinovic, P. Kristensen, S. Ramachandran e M. Brodsky, *Record-length transmission of photons entangled in orbital angular momentum (OAM)*, Conference paper, Frontiers in Optics 2011, San Jose, California, USA, 2011.

[11] N. Bozinovic, P. Kristensen e S. Ramachandran, *Are orbital angular momentum (OAM/Vortex) states of light long-lived in fibers?*, Conference paper, Frontiers in Optics 2011, San Jose, California, USA, 2011.

[12] A. M. Yao e M. J. Padgett, *Orbital angular momentum: origins, behavior and applications*, in "Advances in Optics and Photonics", vol. 3, Issue 2, 2011, pp. 161-204.

[13] A. Bennis, R. Niemiec, C. Brousseau, K. Mahdjoubi e O. Emile, *Flat plate for OAM generation in the millimeter band*, in "EuCAP 2013 – 7th European Conference on Antennas & Propagation", Gothenburg, Sweden, 2013, pp. 3203-3207.

[14] J. R. Trinder, Patent WO/2005/069 443, 2005.

[15] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini e F. Romanato, *Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test*, in "New Journal of Physics", vol. 14, Issue 3, 2012.

[16] S. M. Mohammadi, L. K. S. Daldorff, J. E. S. Bergman et al., *Orbital angular momentum in radio - a system study*, in "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", vol. 58, Issue 2, 2010, pp. 565–572.

[17] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm et al. , *Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain*, in "Physical Review Letters", vol. 99, Issue 8, 087701, 2007.

[18] F. Tamburini, B. Thidé, E. Mari et al. , *N-tupling the capacity of each polarization state in radio links by using electromagnetic vorticity*, Cornell University Library, 2013

[19] M. Tamagnone, C. Craeye e J. Perruisseau-Carrier, *Comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test'*, in "New Journal of Physics", vol. 14, 2012.

[20] M. Tamagnone, C. Craeye e J. Perruisseau-Carrier, *Comment on Reply to comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test'*", in "New Journal of Physics", vol. 15, Luglio 2013.

[21] O. Edfors e A. J. Johansson, *Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?*, in "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", vol. 60, no. 2, 2012, pp. 1126–1131.

[22] F. Tamburini, B. Thidé, E. Mari et al., *Reply to comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test'*, in "New Journal of Physics", vol. 14, Novembre 2012.

[23] Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, et al., *High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing*, in "Nature Communications", vol. 5, no. 4876, 2014.

[24] E. Mari, F. Spinello, M. Oldoni, et al., *Near-Field Experimental Verification of Separation of OAM Channels*, in "IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters", vol. 14, 2015, pp. 556-558.

[25] F. Spinello, E. Mari, M. Oldoni, et al., *Experimental near field OAM-based communication with circular patch array*, Cornell University Library, 2015.

[26] A. T. O'Neil, I. MacVicar, L. Allen e M. J. Padgett, *Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam*, in "Physical Review Letters", vol. 88, Issue 5, 053601, 2002.

[27] G. C. G. Berkhout, M. P. J. Lavery, J. Courtial, M. W. Beijersbergen e M. J. Padgett, *Efficient sorting of orbital angular momentum states of light*, in "Physical Review Letters," vol. 105, 153601, 2010.

[28] B. Jack, J. Leach, J. Romero, et al., *Holographic ghost imaging and the violation of a Bell inequality*, in "Physical Review Letters", vol. 103, 083602, 2009.

Momento Angolare Orbitale:

rivisitazione del concetto di Link Budget per un collegamento radio.

Andrea **Cagliero**[1], Rossella **Gaffoglio**[1], Assunta **De Vita**[2], Bruno **Sacco**[2]
[1]**Università di Torino** - Dipartimento di Fisica
[2]**Rai** - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Il computo del "link budget" è fondamentale per progettare un collegamento radio in termini di rapporto tra la potenza intercettata dal ricevitore e quella emessa dall'apparato trasmittente. Come ben noto, nel caso di onde convenzionali, tale rapporto si ottiene tramite l'equazione di Friis a partire dai guadagni d'antenna, che presentano un massimo nella direzione del collegamento. Purtroppo, il suddetto approccio fornisce un risultato inconsistente nel caso di una trasmissione OAM, poiché, sotto l'ipotesi di puntamento ottimale, i diagrammi d'antenna esibiscono un guadagno minimo sull'asse, come conseguenza del tipico profilo di intensità "a ciambella" che caratterizza i fasci vorticosi. Alla luce di ciò appare evidente come nel caso OAM la regola per determinare il link budget debba essere rivisitata tenendo conto della struttura peculiare dei fronti d'onda.

Il presente articolo propone una riformulazione dell'equazione di Friis per collegamenti OAM tra schiere di antenne, in grado di sfruttare il profilo di fase azimutale di un fascio vorticoso a seguito di un opportuno rifasamento del segnale in ricezione. Il link budget proposto fornisce, in funzione degli angoli di azimuth ed elevazione, ciò che viene definito "OAM-link pattern". Tale diagramma, che presenta un massimo lungo l'asse del fascio in corrispondenza di un corretto rifasamento, è infine riportato graficamente nel caso di trasmissioni OAM tra schiere circolari uniformi.

1. Introduzione

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse per la ***radiazione elettromagnetica vorticosa***, come testimonia il suo largo impiego negli esperimenti di ottica moderna [1] [2] [3]; nonostante questo, solo di recente [4] è stata proposta l'idea di un suo possibile utilizzo nelle comunicazioni radio in spazio libero. Tale possibilità sembrerebbe offrire una soluzione all'attuale problema della congestione della banda radio. Tuttavia, il suo possibile impiego nel campo delle frequenze radio, mediante le tecnologie attuali, rivela delle limitazioni intrinseche dovute principalmente alla peculiare topologia dei fasci **OAM** (*Orbital Angular Momentum, Momento Angolare Orbitale*), il cui profilo di intensità si annulla in una regione centrale che aumenta di sezione al crescere della distanza [5]. Questo problema diventa particolarmente critico quando si considera una comunicazione radio in *far-field*, dove la divergenza dei fasci non è trascurabile e solo una piccola frazione del fascio può essere intercettata dall'antenna ricevente.

Al fine di valutare l'effettiva rilevanza e utilizzabilità di queste onde vorticose, è fondamentale introdurre un approccio teorico semplice che permetta di stimare il segnale ricevuto, quando siano note le caratteristiche delle antenne di trasmissione e ricezione, la potenza trasmessa e la distanza dal trasmettitore. Questo calcolo, noto con il termine ***link budget***, è semplice da eseguire nel caso delle onde convenzionali utilizzando l'*Equazione di Friis*, o *Equazione della trasmissione*. Nel caso delle onde vorticose, tuttavia, non esiste una procedura analoga, di conseguenza l'*Equazione di Friis* non è più applicabile, essendone i presupposti (che si basano essenzialmente sul concetto di antenna pattern e dunque sul limite di far-field) in ampia parte cambiati. Il tentativo di applicare le regole standard per il calcolo del link budget al caso dell'**OAM** porta inevitabilmente a risultati inconsistenti [6]. Occorre pertanto introdurre una nuova formulazione per il link budget che tenga in considerazione il *mode-matching* tra il fronte d'onda e l'antenna, esplicitando quell'informazione che non può essere ricavata dal pattern di antenna tradizionale [7].

Nel presente articolo proponiamo il nuovo concetto di ***link budget per trasmissioni OAM***, presentandone l'applicazione al caso di schiere (circolari) di antenne, particolarmente utili poiché consentono la trasmissione simultanea di più segnali.

2. Link Budget

Quando si considera una trasmissione di onde radio, uno degli aspetti più rilevanti da prendere in esame è il cosiddetto pattern d'antenna o guadagno d'antenna ***G(θ, φ)***, che rappresenta il modulo della componente radiale del vettore di Poynting normalizzato, espresso, nel limite di far-field, in funzione degli angoli polari. Mentre nel caso delle onde convenzionali questo diagramma presenta solitamente un massimo principale (noto come "main lobe") in corrispondenza di $\theta=0$, nel caso **OAM** il main lobe si trova a $\theta\neq0$ e descrive una corona al cui centro il guadagno decade rapidamente, raggiungendo un minimo in $\theta=0$ che riflette la presenza del vortice centrale.

In figura 1 è riportato un esempio di diagramma d'antenna nel caso standard ($\ell=0$) e **OAM** ($\ell\neq0$).

Nel caso di onde convenzionali, questo pattern gioca un ruolo fondamentale per la stima del link budget e può essere usato per calcolare l'equazione di trasmissione. Infatti, dato un sistema trasmittente **T**, un sistema ricevente **R** e i corrispondenti pattern d'antenna $G_T(\theta_T, \varphi_T)$ e $G_R(\theta_R, \varphi_R)$, il rapporto fra la potenza trasmessa e quella ricevuta nello spazio libero può essere stimato in maniera semplice tramite la formula (*Equazione di Friis*):

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R, \quad (1)$$

dove **λ** è la lunghezza d'onda, ***d*** rappresenta la distanza del collegamento e G_T e G_R corrispondono ai guadagni di main lobe lungo la direzione **T**-**R**.

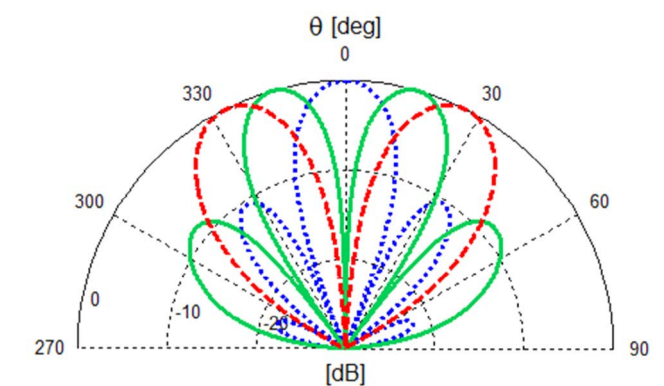
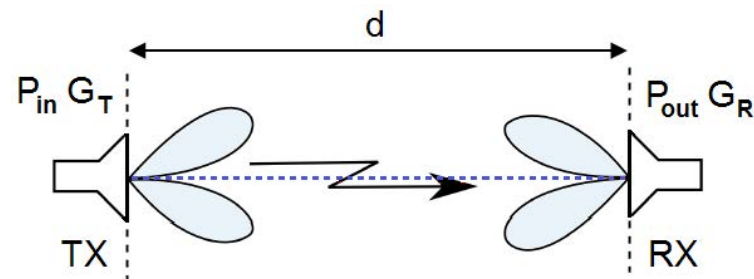



Fig. 1 – Diagramma d'antenna: caso standard $\ell=0$ (blu), $\ell=\pm1$ (verde), $\ell=\pm2$ (rosso)

Fig. 2 – Trasmissione di un fascio vorticoso tra due antenne OAM poste a distanza *d* [6]

3. Paradosso OAM

Estendendo la procedura illustrata nel precedente paragrafo al caso di antenne **OAM**, si ottiene che, sotto l'ipotesi di puntamento ottimale (*θ=0*), il segnale ricevuto risulterebbe nullo, perché tale è il guadagno in asse delle antenne **OAM**. Come si può facilmente dedurre osservando la figura 2, il tentativo di stimare il link budget relativo ad un canale di comunicazione costituito da due antenne **OAM** con l'equazione (1) conduce ad un risultato inconsistente, poiché il lobo principale dei diagrammi d'antenna OAM è collocato ad un angolo diverso da quello corrispondente alla direzione di propagazione. Saremmo quindi portati a concludere che la condizione di puntamento ideale non corrisponda più a quella classica in cui gli assi ottici delle due antenne coincidono. Tuttavia, poiché l'informazione rilevante di un fascio **OAM** risiede nella struttura peculiare del fronte d'onda, che si degrada allontanandosi dalla singolarità centrale, appare evidente come nel caso **OAM** l'*equazione di Friis* debba essere riformulata per tenerne conto.

4. Link budget per trasmissioni OAM

4.1 Formulazione analitica

Come già accennato in precedenza, un approccio generale per produrre un fascio **OAM** alle frequenze radio consiste nell'utilizzare un array di N_T radiatori identici, alimentati con un insieme di correnti fornite dalla sintesi di un'onda vorticosa ideale. La ricezione di tale fascio può essere effettuata utilizzando un analogo array posto di fronte a quello trasmittente, alla distanza prescelta, in posizione perpendicolare alla linea che connette i loro centri. In figura 3 è riportato un esempio di due array circolari uniformi composti da 4 radiatori tipo Yagi-Uda.

Se si considera la generazione di un fascio **OAM** con indice azimutale ℓ_T, la tensione indotta sul *p*-esimo elemento in ricezione, data dal prodotto scalare tra la sua altezza efficace e il campo elettrico incidente [8], può essere scritta come:

$$V_p^{\ell_T} = i\,k\,\eta \sum_{n=1}^{N_T} \frac{e^{-i\,k\,r_{n\,p}}}{4\pi\, r_{n\,p}}\, I_n^{\ell_T}\, \vec{h}_{n\,p}^{\,T} \cdot \vec{h}_{p\,n}^{\,R}, \quad (2)$$

essendo $k=2\pi/\lambda$ il modulo del vettore d'onda, η l'impedenza del vuoto e

$$I_n^{\ell_T} = \left(I_0 \big/ \sqrt{N_T}\right) \xi_n^{\ell_T}$$

la corrente d'ingresso ai capi dell'n-esima antenna assumendo di considerare uno splitter privo di perdite (lossless splitter). Nella precedente espressione, $\xi_n^{\ell_T}$ è il coefficiente di alimentazione che emerge dalla sintesi del segnale **OAM** di indice ℓ_T considerato, mentre I_0 è un termine costante di corrente associato alla potenza totale in ingresso P_{in}. Inoltre, in (2), $\vec{r}_{n\,p}$ è un vettore che collega l'*n*-esimo trasmettitore con il *p*-esimo ricevitore, mentre $\vec{h}_{n\,p}^{\,T}$ e $\vec{h}_{p\,n}^{\,R}$ sono le altezze efficaci relative a ciascun link reciproco tra le antenne, valutate alle coordinate angolari che definiscono la direzione dall'*n*-esimo trasmettitore al *p*-esimo ricevitore, e viceversa, conformemente al relativo sistema di riferimento.

Fig. 3 – Rappresentazione schematica di due array circolari uniformi composti da 4 antenne Yagi-Uda

La tensione totale indotta sull'intero array ricevente si ottiene sommando i contributi di tensione su ogni singolo elemento. Occorre sottolineare che, a causa del peculiare pattern di fase associato ad un fascio **OAM** con $\ell\neq0$, questa lettura standard dei segnali ricevuti porta inevitabilmente ad una loro cancellazione reciproca, annullando la potenza ricevuta lungo l'asse del fascio.

Da queste considerazioni si evince che bisogna tenere conto della struttura di fase di un'onda **OAM**, introducendo un opportuno peso di fase al ricevitore, dettato dalla scelta della configurazione **OAM** d'interesse. In virtù dell'ortogonalità che caratterizza i fasci **OAM**, soltanto un rifasamento dei segnali ricevuti coerente al segnale **OAM** trasmesso ($\ell_R=\ell_T$) consente una corretta ricezione, determinando un massimo di potenza sull'asse laddove il corrispettivo pattern di radiazione convenzionale si annullerebbe.

Sommando i contributi rifasati degli N_R elementi dell'array ricevente, si ricava, con qualche semplice passaggio analitico, la formula (3), utilizzabile per la stima del link budget nel caso di un collegamento radio **OAM**.

In sintesi, la formula (3) tiene conto di ogni singolo collegamento tra le N_T antenne trasmittenti e le N_R riceventi, considerando le rispettive altezze efficaci e la collocazione geometrica; *R* rappresenta la resistenza dei radiatori, mentre $\xi_p^{-\ell_R}$ è il coefficiente di alimentazione assegnato al *p*-esimo elemento ricevente, derivante dalla sintesi di un segnale **OAM** con indice $-\ell_R$ (il segno meno è dovuto al fatto che l'array ricevente ha un orientamento opposto a quello dell'array trasmittente). La formula (3) fornisce il rapporto tra la potenza ricevuta $P_{out}^{\ell_{T,R}}$ e la potenza trasmessa P_{in}, ovvero l'esatto analogo della formula di Friis per il caso **OAM**.

4.2 OAM-link pattern

Parametrizzando la formula (3) in funzione degli angoli di rotazione di una delle due schiere si ottiene, nel caso di corretto rifasamento ($\ell_R=\ell_T$), il diagramma di trasmissione che definiamo *OAM-link pattern*.

La procedura introdotta è stata progressivamente applicata in vari contesti, a partire da una situazione idealizzata in cui si è trascurata la presenza fisica delle antenne per lavorare direttamente con il campo dei modi teorici parassiali (*fasci Laguerre-Gauss* e *Bessel-Gauss*), quindi nel caso di radiatori isotropici puntiformi, per considerare in una fase successiva casi via via più realistici (radiatori Hertziani, dipoli a mezz'onda e, infine, antenne Yagi-Uda). La formula (3) comprende come caso particolare l'equazione di Friis classica, alla quale si riconduce nel caso di onda convenzionale con indice $\ell=0$.

La validità della (3) è stata inoltre verificata con l'ausilio del software COMSOL *Multiphysics*. Successivamente, l'implementazione della formula mediante

$$\frac{P_{out}^{\ell_{T,R}}}{P_{in}} = \left| \frac{i\,k\,\eta}{2R} \frac{1}{\sqrt{N_T N_R}} \sum_{p=1}^{N_R} \sum_{n=1}^{N_T} \frac{e^{-i\,k\,r_{n\,p}}}{4\pi\, r_{n\,p}}\, \xi_n^{\ell_T}\, \xi_p^{-\ell_R}\, \vec{h}_{n\,p}^{\,T} \cdot \vec{h}_{p\,n}^{\,R} \right|^2 \quad (3)$$

Momento Angolare Orbitale: Link Budget

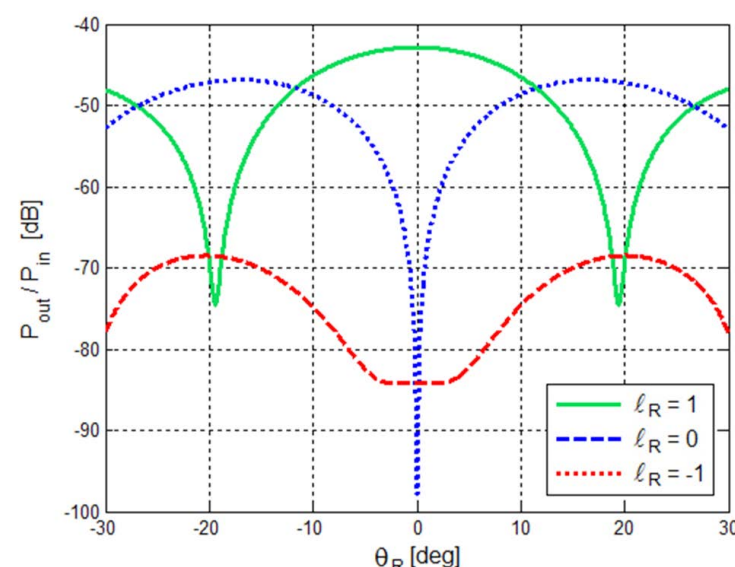



Fig. 4 – Potenza totale ricevuta normalizzata alla potenza irradiata in funzione dell'angolo di rotazione θ_R relativo all'array ricevente. Il fascio OAM trasmesso ha un indice azimutale ℓ_T=*1*, mentre ℓ_R fa riferimento a tre diverse configurazioni di rifasamento in ricezione

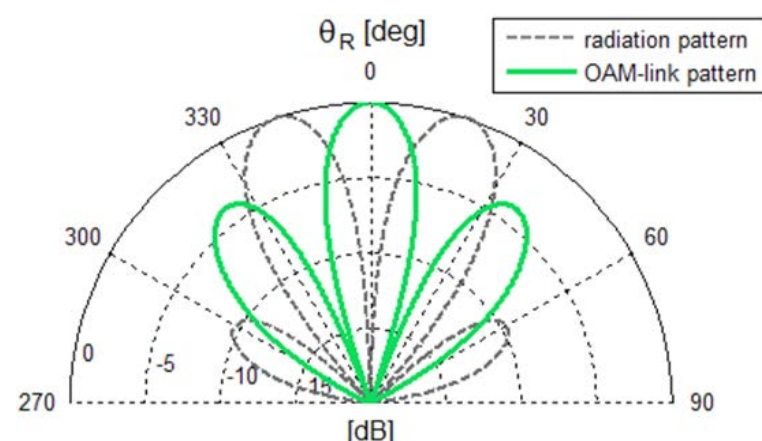



Fig. 5 – *Linea continua*: OAM-link pattern (potenza totale ricevuta in dB in funzione dell'angolo di rotazione θ_R per la configurazione ricevente ℓ_R=ℓ_T=*1*); *linea tratteggiata*: pattern di radiazione convenzionale per ℓ_T=*1*. Entrambe le curve sono normalizzate ai loro rispettivi massimi

i software *MATLAB* e *Mathematica* ha permesso di ottenere un codice flessibile in cui tutti i parametri fisici in gioco (frequenza, indici azimutali ℓ_T e ℓ_R, numero di radiatori, raggio delle schiere, distanza di trasmissione, ecc) possono essere modificati liberamente e il cui risultato corrisponde al grafico del diagramma di trasmissione **OAM**.

Il grafico dell'*OAM-link pattern*, come funzione dell'angolo di rotazione θ_R della schiera ricevente, è riportato nelle figure 4 e 5 in formato cartesiano e polare, rispettivamente, nel caso di due schiere circolari uniformi identiche poste ad una distanza di 40 m e costituite da 4 antenne Yagi-Uda, per un valore di lunghezza d'onda λ=1.46 m.

Come previsto, in corrispondenza di θ_R= *0* l'ortogonalità dei fasci **OAM** al suo valore massimo, insieme al matching di polarizzazione delle antenne, permette una ricezione significativa del segnale solo quando la configurazione rifasata è ℓ_R=ℓ_T=*1* (ossia la curva verde continua), presentando un massimo di potenza lungo l'asse in corrispondenza del nullo del pattern di radiazione convenzionale. Questo comportamento è mostrato in maniera chiara nel plot polare di figura 5.

Nel grafico della potenza ricevuta relativa alla configurazione distruttiva (ossia la curva rossa tratteggiata in figura 4) non è presente un nullo netto a causa della direttività degli elementi dell'array considerato.

5. Conclusioni

In questo articolo è stata riformulata l'equazione della trasmissione (o *link budget*) nel caso in cui si considerino comunicazioni **OAM** tra schiere di antenne. In particolare, implementando matematicamente un opportuno calcolo si ottiene, in corrispondenza di un determinato rifasamento, un diagramma angolare della potenza totale ricevuta con un lobo principale convenzionale lungo l'asse del fascio.

Nonostante i grafici qui riportati si riferiscano al caso specifico di trasmissioni tra schiere circolari uniformi, è importante sottolineare come l'approccio presentato per il computo del *link budget* sia applicabile a schiere generiche di radiatori, previo un opportuno processo di sintesi dei coefficienti di trasmissione e ricezione da inserire nella formula (3).

Infine, è utile notare come la formulazione proposta fornisca gli stessi risultati dell'*equazione di Friis* nel caso in cui la radiazione trasmessa abbia indice ℓ=*0*.

Bibliografia

[1] M. J. Padgett e L. Allen, *Light with a twist in its tail*, in "Contemporary Physics", vol. 41, Issue 5, 2000, pp. 275-285.

[2] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett et al., *Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum*, in "Optics Express", vol. 12, Issue 22, 2004, pp. 5448-5456.

[3] J. Wang, J.-Y. Yang, I.-M. Fazal et al., *Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing*, in "Nature Photonics", Numero 6, 2012, pp. 488-496.

[4] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini e F. Romanato, *Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test*, in "New Journal of Physics", vol. 14, Issue 3, 2012.

[5] M. Tamagnone, C. Craeye e J. Perruisseau-Carrier, *Comment on Reply to comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test'*, in "New Journal of Physics", vol. 15, Luglio 2013.

[6] D. K. Nguyen, O. Pascal, J. Sokoloff, A. Chabory, B. Palacin e N. Capet, *Discussion about the link budget for electromagnetic wave with orbital angular momentum*, in "EuCAP 2014 - The 8th European Conference on Antennas and Propagation", 2014.

[7] A. Cagliero, A. De Vita, R. Gaffoglio e B. Sacco, *A New Approach to the Link Budget Concept for an OAM Communication Link*, in "IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters", vol. 15, pp. 568 - 571, 2016

[8] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, Rutgers University, 2014.

La radio lineare personalizzata:

un nuovo framework per i contenuti radiofonici

Paolo **Casagranda**, Francesco **Russo**, Raffaele **Teraoni Prioletti**
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Il presente articolo propone la hybrid content radio, radio lineare personalizzata, un nuovo framework per i contenuti radiofonici, che migliora l'esperienza della radio tradizionale arricchendola di contenuti audio personalizzati.

Diversamente dalla maggior parte dei servizi commerciali di raccomandazione basati sullo streaming via Internet (Spotify, Pandora), questo framework permette l'aggiunta sistematica di contenuti audio alla struttura audio lineare esistente del canale radio. Lo scopo del framework della hybrid content radio è quello di migliorare il palinsesto dei programmi dell'emittente con contenuti personalizzati e contestuali provenienti da Internet.

La personalizzazione può basarsi sul profilo, lo stato emotivo, l'attività svolta, la posizione geografica, il meteo e tutti quei fattori che contribuiscono a caratterizzare lo stato di chi ascolta. Il risultato finale di questo arricchimento è quello di migliorare l'esperienza di ascolto degli utenti, riducendo la propensione a navigare tra i canali e proponendo contenuti più mirati, come ad esempio notizie locali, intrattenimento, musica e anche spot pubblicitari rilevanti. In questo modo, l'approccio della hybrid content radio presenta un miglioramento funzionale sia all'ottimizzazione delle risorse di rete sia alla personalizzazione dell'esperienza dell'ascoltatore, permettendo l'uso sia del canale diffusivo che di Internet.

1. Introduzione

Il presente articolo introduce e descrive il concetto di ***radio lineare personalizzata*** (***hybrid content radio*** nel seguito), dando una panoramica dei recenti servizi sperimentali proposti da un gruppo di broadcaster europei allo scopo di esplorare le potenzialità di un approccio ibrido per l'audio nella radio. Nella *hybrid content radio* (***HCR***) la tradizionale trasmissione radio lineare è il fulcro attorno al quale viene costruito un nuovo servizio, che utilizza contenuti audio di arricchimento forniti dagli archivi dell'emittente o da fornitori abilitati. Il riferimento principale per il framework è l'articolo [1], che è stato presentato alla **International Broadcasting Convention** nel settembre 2015.

Diversamente dalla maggior parte dei servizi basati su streaming audio da Internet, questo framework permette l'aggiunta di contenuti personalizzati ad una struttura audio lineare esistente: il palinsesto dei programmi del broadcaster. In particolare, **HCR** permette di arricchire il palinsesto lineare dell'emittente con contenuti audio personalizzati e contestuali. Il contesto può essere lo stato emotivo, la posizione geografica, il gruppo, il meteo e tutti quei fattori che contribuiscono a descrivere lo stato di chi ascolta [2]. Il risultato finale di questo arricchimento è quello di migliorare l'esperienza di ascolto degli utenti, proponendo contenuti mirati, come ad esempio notizie, intrattenimento, musica e anche spot pubblicitari rilevanti. Nel fornire le personalizzazioni il broadcaster pubblico deve, inoltre, tenere conto della sua missione e dare il dovuto spazio ad altri aspetti quali la cultura, l'educazione, l'informazione e in generale quanto concordato sul contratto di servizio. La tecnica proposta fornisce una personalizzazione dei contenuti ad un costo minimo di banda, poiché viene privilegiato il canale audio tradizionale, a differenza delle playlist di musica esistenti su Internet. In questo modo, ***HCR*** permette un'ottimizzazione dell'uso della banda. La figura 1 illustra il concetto.

Il framework proposto può essere applicato sia a contenuti audio che video. Tuttavia, l'audio, rispetto a immagini e video, ben si adatta a contesti in cui l'ascoltatore segue altre attività. È comune vedere persone che ascoltano la radio mentre camminano, vanno in bici o guidano. In questo senso, il contesto ha un impatto più complesso sulla radio che sulla televisione.

2. Stato dell'arte

Esistono diversi servizi per la creazione di playlist musicali in streaming altamente personalizzate che sfruttano differenti tecniche di raccomandazione sui contenuti: *Pandora*, *che* ad esempio si basa sulle caratteristiche dei contenuti estratte da esperti (il *Music Genome Project* [3]), o *Spotify* [4] che, come altri servizi, utilizza tecniche di *collaborative filtering* o *ibride*.

I servizi di musica in streaming spesso utilizzano sistemi di raccomandazione di tipo *collaborative filtering*, *content-based filtering* oppure basate sui *social* (si vedano i dettagli su [5] [6] [7]) utilizzando esclusivamente il canale Internet per raggiungere chi ascolta con playlist totalmente personalizzate.

A differenza di questi servizi, la ***hybrid content radio*** analizza tutti quegli scenari intermedi in cui il contenuto audio lineare è sostituito dal contenuto audio personalizzato, in parte ed in modo flessibile [1].

Diversi progetti europei hanno considerato l'arricchimento del contenuto video trasmesso e la ricombinazione di oggetti trasmessi da parte del ricevitore. In particolare, i progetti *iMedia* e *Savant IST* [8] [9] [10] hanno utilizzato liste di contenuti raccomandati e spot pubblicitari personalizzati per servizi televisivi; i sistemi proposti in questi progetti in genere non hanno considerato il *contesto dell'utente.* E anche i servizi di raccomandazione di musica degli ultimi anni si sono basati quasi esclusivamente sulla somiglianza tra utenti e tra contenuti, o sul tipo di contenuto. Solo recentemente la ricerca ha iniziato a considerare le informazioni sul contesto dell'utente, sfruttando ad esempio la posizione, l'umore o il tipo di attività degli utenti [11].

Negli ultimi anni, diversi ricercatori hanno analizzato tecniche di raccomandazione *context-based* per contenuti audio. Sono stati proposti servizi che utilizzano anche la posizione dell'ascoltatore, come il prototipo *Foxtrot* [12], un'applicazione audio *location-based* che utilizza audio forniti dalla collettività, riproducendo una playlist di musica

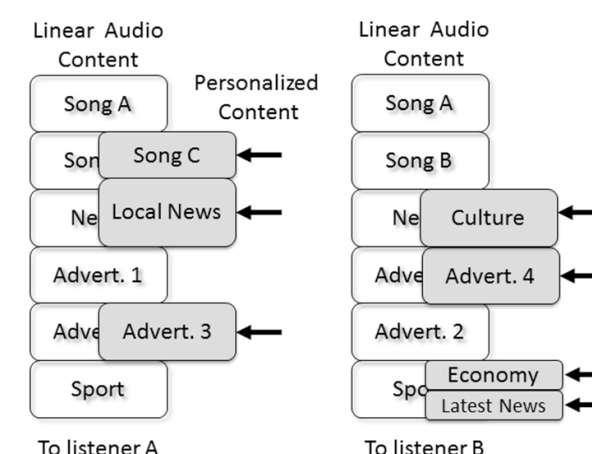



Fig. 1 – Il concetto di *hybrid content radio*: arricchimento di audio lineare broadcast mediante sostituzione con contenuti audio personalizzati

geo-referenziata generata automaticamente. Altri esempi sono *BusBuzz*, del **MIT** [13], che crea un'esperienza di musica sociale mentre ci si trova su un bus, e *Loco-radio*, sempre del **MIT** [14], un sistema di realtà aumentata audio che crea un paesaggio audio durante gli spostamenti dell'ascoltatore.

La ***hybrid content radio*** mantiene il palinsesto dell'emittente per permettere al framework di costruire un nuovo servizio, considerando esso stesso parte del contesto, in modo che il contenuto audio di arricchimento sia incluso in conformità al palinsesto. Questo è un elemento nuovo rispetto ai precedenti studi.

HCR ha le sue radici nel lavoro svolto dal progetto ***RadioDNS*** che ha preso in considerazione la radio ibrida, focalizzandosi maggiormente sull'arricchimento del contenuto audio con immagini, testo e metadati, e permettendo anche di collegare contenuti esterni, come specificato sulle norme tecniche **ETSI** [15].

3. Dimostrazioni sperimentali del concetto

Il concetto di ***radio lineare personalizzata*** è stato implementato in diverse dimostrazioni, alcune delle quali presentate ad **IBC 2015** [1]. Di seguito se ne descrivono le più significative:

- **Rai** ha sviluppato un prototipo di radio lineare personalizzata basata sull'analisi dei contenuti e su raccomandazioni contestuali, alla base di quanto descritto nella prossima sezione;

- **IRT** ha proposto il progetto ***HbbRadio***, basato in primo luogo sul riconoscimento del contesto dell'utente e sulla sua profilazione dinamica. Il sistema ***HbbRadio*** definisce il contesto in base ad attività e localizzazione dell'utente omogenee [1]. In secondo luogo, il sistema personalizza la distribuzione del contenuto, in parte *broadcast* e in parte da *Internet*, basata su una *EPG* (*Electronic Programme Guide*) che ricalca quella dell'offerta lineare, con alcuni arricchimenti. Il contenuto raccomandato è selezionabile attraverso icone aggiuntive sulla *EPG*, oppure raggiungibile tramite una funzione di *skip*. Il dimostratore presentato utilizzava il **DAB+** per i contenuti lineari;

- il centro di ricerca **TCP AG** ha presentato i servizi ***DIY.FM*** e ***musicBan***. ***DIY.FM*** è un progetto nato nel 2012, creato da **TCP AG**, che combina i contenuti di 17 stazioni radio pubbliche svizzere. L'utente può creare un suo palinsesto personalizzato combinando contenuti lineari e non lineari dei broadcaster. ***MusicBan*** è un audio player basato sulle *API* di ***DIY.FM*** in grado di eliminare musica non gradita all'ascoltatore sostituendola automaticamente con musica diversa [1];

- il broadcaster pubblico olandese **NPO** ha presentato un concetto analogo basato su una funzione di *skip* dei contenuti, in cui l'ascoltatore può saltare alcuni programmi audio e accedere a contenuti alternativi preparati dai DJ;

- si segnala anche il servizio offerto dall'app **My Capital XTRA,** la cui press release è stata rilasciata a novembre 2015, che permette di fare lo "skip" di alcuni contenuti audio sostituendoli con contenuti scelti dai DJ e, come annunciato in seguito, basate sui feedback dell'utente.

4. La Hybrid Content Radio proposta da Rai

Rai sta sperimentando un prototipo di ***hybrid content radio*** già presentato nel settembre 2015 ad **IBC** e tutt'ora in evoluzione, grazie anche ad una collaborazione con la **Facoltà di Informatica dell'Università di Torino** nell'ambito di un Dottorato di Ricerca.

Il prototipo di *radio lineare personalizzata* proposto permette di utilizzare informazioni sulle preferenze dell'utente e sul suo contesto per selezionare contenuti di arricchimento. Facendo leva sulle preferenze dell'utente e sulle informazioni di contesto il prototipo propone contenuti audio personalizzati in alcune occasioni, arricchendo il palinsesto lineare.

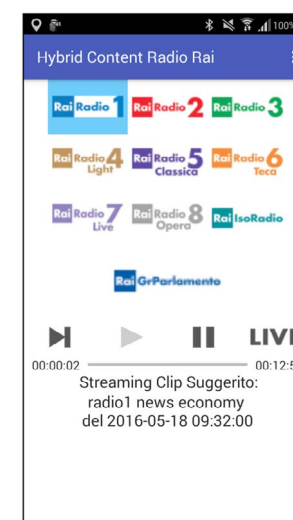



Fig. 2 – Interfaccia del prototipo di radio personalizzata

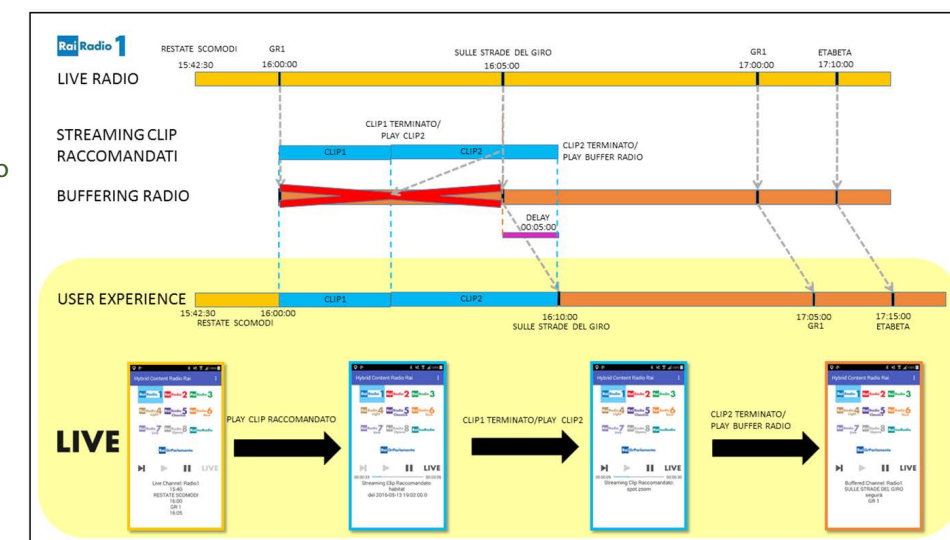
L'interfaccia dell'*app* è illustrata in figura 2. Il contenuto principale proposto all'ascoltatore è veicolato dalla radio lineare offerta sul canale radio su cui egli è effettivamente sintonizzato.

Sono stati creati due diversi percorsi per l'accesso ai contenuti di arricchimento:

a) uno *skip manuale*, che permette all'ascoltatore di fare un'esplicita richiesta di contenuti suggeriti e
b) un *inserimento automatico* pilotato dal server di raccomandazione

Lo *skip manuale* permette di interrompere immediatamente il programma attuale ed ascoltare contenuti da una lista creata dal motore di raccomandazione, attualmente *content-based* [5]. I nuovi contenuti sono estratti dagli *archivi Rai* e comprendono programmi di intrattenimento, cultura, economia, scienza e informazione in genere e sostituiscono quelli della programmazione lineare. Alla fine del clip raccomandato riprende la programmazione lineare, dall'ultimo cambio di programma, grazie al controllo del buffering audio.

L'*inserimento automatico* permette di includere nuovi contenuti audio pilotati dal server grazie ad algoritmi basati sulle preferenze, sulla storia di navigazione e sul contesto dell'ascoltatore (*context-based recommender system*). Il feedback può essere esplicito, in questo caso l'ascoltatore può inserire un giudizio positivo o negativo sul programma in ascolto, o implicito e, in questo caso, un tempo di ascolto opportunamente lungo verrà interpretato come feedback positivo e, al contrario, uno *skip* o un cambio canale come feedback negativo. La figura 3 illustra ciò che accade quando l'*app* riceve una lista di clip raccomandati. Il flusso lineare si interrompe e invece del programma previsto vanno in onda i due clip raccomandati. La programmazione continua, alla fine dei due clip, con l'ultimo programma lineare disponibile, ritardato opportunamente grazie al buffering audio.

Fig. 3 – Le fasi dell'inserimento dei contenuti personalizzati nel palinsesto lineare

5. Linee guida per la creazione di un servizio di Hybrid Content Radio

Di seguito verranno analizzati gli aspetti tecnici fondamentali per la creazione di un servizio **HCR**, delineando la strada per studi e sviluppi futuri.

5.1 Metadati e link per arricchire il contenuto

Il requisito tecnico fondamentale per la creazione di un servizio di **HCR** sono i metadati con le informazioni di palinsesto (*programma corrente* e *programmazione futura*). I metadati devono riportare accuratamente tempi e descrizione dei programmi, permettendo di inserire al momento giusto eventuali contenuti sostitutivi. Per i metadati, sono raccomandate le specifiche ***ETSI Service and Programme Information (SPI)*** [15]. In [1] viene proposto di utilizzare l'elemento `<link>` del ***SPI*** per descrivere il collegamento ai contenuti di arricchimento, in questo modo:

```
<link uri="http://broadcaster.example/hcr.xml"
mimeValue="application/hcr+xml" description="hybrid
content radio recommendation list"/>
```

Il ricevitore, trovato l'elemento **<link>**, ad esempio in un programma, verificherà il *MIME type* e provvederà ad arricchire il servizio con le clip prelevate dalla lista collegata.

5.2 Sincronizzazione

È importante evidenziare che il contenuto audio di arricchimento deve essere perfettamente sincronizzato con il contenuto lineare rimpiazzato. Il problema principale è conseguenza delle diverse tecnologie che l'**HCR** può utilizzare come sorgente audio lineare: **DAB+**, **FM** o **Internet** rappresentano le alternative, ognuna con un suo ritardo rispetto al tempo nominale di schedulazione.

Qualora i protocolli utilizzati non prevedano l'utilizzo di metadati di sincronizzazione, la soluzione più semplice è quella di specificare, per ogni tecnologia di trasmissione, il ritardo stimato tra il tempo di schedulazione e quello di ricezione. Un'altra tecnica proposta è basata sull'analisi di campioni audio per riallineare la base tempi dei programmi con il tempo verificato di ricezione, indipendentemente dal ritardo e dalla tecnologia di trasmissione [16].

5.3 Contesto dell'utente e raccomandazioni standard

Al fine di ottenere delle raccomandazioni il più possibile significative e personalizzate, il ricevitore deve raccogliere informazioni accurate di contesto (*posizione*, *umore*, *attività*) e analizzare il profilo dell'utente.

L'utilizzo di un formato standard per la descrizione delle raccomandazioni, come ad esempio ***MPEG-21 User Description***, può dare diversi vantaggi. Anzitutto, abilita l'integrazione e lo scambio di raccomandazioni tra motori di raccomandazione diversi, riducendo il problema di dover fornire raccomandazioni anche ad utenti di cui non si hanno ancora informazioni o si conosce poco. Secondo, apre a un vero e proprio mercato di *motori di raccomandazione interoperabili* (si veda ad es. [22]).

5.4 Cross-Platform Authentication (CPA)

Oggigiorno, un numero sempre crescente di ascoltatori accede ai servizi radio con diversi dispositivi: dalla radio di casa a quella in auto, dalla radio sullo smartphone a quella sul PC.

L'adozione di un metodo comune di autenticazione per l'accesso a questi dispositivi rappresenta una indubbia facilitazione per mantenere le preferenze dell'utente anche cambiando dispositivo. La *raccomandazione **EBU** sulla CPA* [17] punta a risolvere proprio questo problema. Il *protocollo CPA* può essere usato per identificare un ascoltatore su differenti dispositivi, associando in modo sicuro un *dispositivo di ascolto* connesso a Internet con un *account utente*. Questa associazione abilita la spedizione verso l'utente di servizi personalizzati come raccomandazioni o servizi di *pause/resume* di contenuti su dispositivi diversi. In questa prima versione, la *CPA* contiene le specifiche per la connessione di dispositivi con limitate capacità di input, come le *Radio Ibride*. L'utilizzo della CPA permette di fatto un servizio ***HCR*** *cross-platform*.

5.5 Adattamento dei contenuti di arricchimento

Un'altra sfida è costituita dall'appropriata fusione tra *contenuti broadcast*, governati da un palinsesto lineare, e *contenuti personalizzati*.

È inverosimile che i *contenuti personalizzati* possano essere inseriti senza adattamento. L'utilizzo di tecniche di buffering risolve in parte il problema. Inoltre è auspicabile poter disporre di contenuti adattati al servizio, in particolare per quanto riguarda la durata. Il processo di produzione dovrebbe includere la capacità di generare contenuti di *durata flessibile*. Un esempio di approccio possibile è il sistema *object-based broadcast* recentemente proposto [18].

5.6 Necessità di interfacce software interoperabili

Un vantaggio dell'approccio della ***radio lineare personalizzata*** è che la maggior parte dei contenuti può essere trasmessa sul canale broadcast, efficiente ed economicamente sostenibile, e Internet può essere utilizzato per la personalizzazione.

Gli smartphone e le radio con connessione ad Internet diventano naturali destinatari per questo tipo di servizio, avendo di solito sia il *ricevitore radio* (**FM** o **DAB+**) sia la *connessione ad Internet*. Gli ostacoli alla creazione di un possibile mercato di massa risiedono nella necessità di avere un tuner radio, condizione spesso soddisfatta negli smartphone, e nella mancanza di una *API* standard per l'accesso al tuner. Gli sforzi più concreti per far fronte a questi problemi si concretizzano con l'iniziativa, guidata da **EBU**, ***Smart Radio Initiative*** [19] e con lo ***Universal Smartphone Radio Project*** [20].

5.7 Rilevazione dei gruppi

La *personalizzazione* si rivolge in genere ad un ascoltatore. Esistono però molte situazioni in cui un contenuto viene fruito da *gruppi di persone*: passeggeri in auto, clienti di una palestra o una famiglia in casa.

La qualità della personalizzazione dipende, quindi, anche dal poter conoscere la composizione del gruppo. Una presentazione del problema comprensiva della descrizione dello stato dell'arte e di un possibile approccio basato sull'utilizzo della *localizzazione GPS* e su *fingerprint audio* è presentato in [21].

6. Conclusioni

L'articolo propone il concetto di p***ersonalizzazione della radio lineare***, definendo il framework della ***hybrid content radio***. Nella ***hybrid content radio*** i contenuti lineari ricevuti da un *canale broadcast* e le clip audio suggerite da un *motore di raccomandazione* concorrono a creare un'esperienza migliore per l'utente.

La ***hybrid content radio*** mira sia ad arricchire l'esperienza di ascolto, suggerendo contenuti personalizzati, sia ad ottimizzare l'utilizzo della banda, prediligendo il canale broadcast per l'ascolto dei contenuti.

Il prototipo di servizio di personalizzazione *context-based* sviluppato da **Rai** viene brevemente descritto, come anche alcuni punti critici per la realizzazione di servizi commerciali.

La radio lineare personalizzata

Bibliografia

[1] P. Casagranda, A. Erk, S. O'Halpin, D. Born e W.Huijten, *A Framework for a Context-Based Hybrid Content Radio*, in "Proceedings of 2015 International Broadcasting Convention (IBC)", 2015.

[2] M. Kaminskas e F. Ricci, *Contextual Music Information Retrieval and Recommendation: State of the Art and Challenges*, in "Computer Science Review", Volume 6, Issue 2-3, pp. 89–119, Maggio 2012

[3] Pandora: the Music Genome Project, *http://www.pandora.com/about/mgp* (ultimo accesso 20 giugno 2016)

[4] Spotify, *http://www.spotify.com* (ultimo accesso 20 giugno 2016)

[5] R. Burke, *Hybrid web recommender systems*, in "The adaptive web", Springer-Verlag, pp. 377-408.

[6] O. Celma e P. Lamere, *If you like Radiohead, you might like this article*, in "AI Magazine", Volume 32, Numero 3, pp. 57-66, 2011

[7] F. Ricci, L. Rokach, B. Shapira e P. B. Kantor, editors, *Recommender Systems Handbook*, Springer, 2011

[8] T. Bozios, G. Lekakos, V. Skoularidou e K. Chorianopoulos, *Advanced techniques for personalized advertising in a digital TV environment: The imedia system*, In "Proceedings of the eBusiness and eWork Conference", 2001

[9] K. Chorianopoulos, G. Lekakos e D. Spinellis, *The virtual channel model for personalized television*, in "Proceedings of the European Conference on Interactive Television: from Viewers to Actors?", pp. 59–67, 2003

[10] U. Rauschenbach, W. Putz, P. Wolf, R. Mies e G. Stoll, *A scalable interactive TV service supporting synchronized delivery over broadcast and broadband networks*, in "Proceedings of IBC 2004 conference", 2004

[11] G. Adomavicius, B. Mobasher, F. Ricci e A. Tuzhilin, *Context-aware recommender systems*, in "AI Magazine", Volume 32, Numero 3, pp. 67–80, 2011

[12] A. Ankolekar e T. Sandholm, *Foxtrot: a soundtrack for where you are*, in "IwS '11 Proceedings of Interacting with Sound Workshop: Exploring Context-Aware, Local and Social Audio Applications", pp. 26-31, 2011

[13] MIT BusBuzz, *http://mobile.mit.edu/projects/busbuzz/* (ultimo accesso 20 giugno 2016)

[14] MIT Loco Radio, *http://alumni.media.mit.edu/~wuhsi/projects/locoradio.htm* (ultimo accesso 20 giugno 2016)

[15] ETSI TS 102 818 - V3.1.1 (2015-01), *Hybrid Digital Radio (DAB, DRM, RadioDNS); XML Specification for Service and Programme Information (SPI)*

[16] P. Casagranda, M. L. Sapino e K. S. Candan, *Leveraging Audio Fingerprinting for Audio Content Synchronization and Replacement*, "Media Synchronization Workshop (MediaSync) 2015", 2015

[17] EBU TECH 3366, *The Cross Platform Authentication Protocol*, Version 1.0

[18] M. Armstrong, M. Brooks, A. Churnside, M. Evans, F. Melchior e M. Shotton, *Object-based broadcasting – curation, responsiveness and user experience*, in "IBC2014 Conference", p. 12.2, 2014

[19] European Broadcasting Union, Smart Radio initiative, *http://www3.ebu.ch/contents/news/2014/03/radios-hybrid-future-smart-radio.html* (ultimo accesso 20 giugno 2016)

[20] Universal Smartphone Radio Project, *https://tech.ebu.ch/docs/events/radiosummit15/presentations/18_Universal%20Smartphone%20Radio%20Project%20EBU%20Digital%20Radio%20Summit%202015.pdf* (ultimo accesso 20 giugno 2016)

[21] P. Casagranda, M. L. Sapino e K. S. Candan, *Audio Assisted Group Detection Using Smartphones*, in "IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 2015", 2015

[22] S. Metta, P. Casagranda, A. Messina, M. Montagnuolo e F. Russo, *Leveraging MPEG-21 user description for interoperable recommender systems*, in "Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC'16)", pp. 1072-1074, 2016

A cura della Redazione

Progetto HEAD

Tecnologie e rete per tele-servizio di riabilitazione

Il progetto ***HEAD*** (***H****uman* ***E****mpowerment* ***A****ging and* ***D****isability*) ha lo scopo di realizzare un'infrastruttura tecnologica che supporti un modello di *riabilitazione a domicilio* innovativo e sostenibile per rispondere alle necessità di complessità e continuità di cura a domicilio di persone con disabilità motorie e cognitive. Quando durante l'esercizio di riabilitazione vi è un coinvolgimento della sfera emotiva del paziente, oltre che di quella razionale, i risultati in termini di continuità dell'attenzione, efficacia dell'esercizio e della terapia sono notevolmente maggiori. A tale scopo, per la realizzazione degli esercizi di riabilitazione, vengono utilizzati i contenuti delle **Teche Rai**. La piattaforma informatica realizzata consente di creare esercizi mirati utilizzando anche materiale fornito dalla famiglia del paziente: foto, ricordi, filmati amatoriali, foto della casa e dei luoghi dell'infanzia tratte da *Google Earth*.

Per la fruizione dei contenuti televisivi sono messe a disposizione del progetto ***HEAD*** le tecnologie ***Stretch & Easy TV*** sviluppate dal **Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai**.

Caratteristiche del progetto

Il progetto ***HEAD***, finanziato dalla **Fondazione Cariplo**, ha avuto inzio nel 2014 e prevede una durata di tre anni.

I soggetti coinvolti sono, sul fronte clinico, **Ospedale Valduce–Villa Beretta**, **Fondazione Opera San Camillo–Presidio Sanitario San Camillo** di Torino e **Fondazione Don Carlo Gnocchi** di Milano, mentre, sul fronte tecnologico, sono **Rai-Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica** e **Fondazione ASPHI**.

Quando il cervello subisce un trauma, un danno o semplicemente per un processo di invecchiamento, necessita di costante stimolazione, non solo nei luoghi di cura ma anche a domicilio. Il progetto ***HEAD*** nasce per soddisfare tale necessità, avendo come obiettivo la realizzazione di una piattaforma informatica innovativa e distribuita, per offrire servizi di riabilitazione e tele-riabilitazione cognitiva e motoria, usando esercizi terapeutici appositamente progettati e diversi dispositivi di interfacciamento ad alta tecnologia: *Kinect*, *RF-ID*, *touch screen*, *oculus rift*, *sensoristica indossabile*.

Il progetto si inserisce nel filone di ricerca per la ***e-inclusion*** e le ***tecnologie per il sociale*** e si sposa con il ruolo istituzionale e la "mission" del **Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai**, in linea con quanto previsto dal **Contratto di Servizio Pubblico**.

Un nuovo approccio alla riabilitazione

Le caratteristiche del sistema ***HEAD*** si possono riassumere nei seguenti punti:

- ***multipiattaforma***: il sistema offre la possibilità di presentare i contenuti e proporre gli esercizi, in modalità tradizionale o in telepresenza, condividere le informazioni tra i sanitari e valutare i risultati tramite una serie di terminali quali *connected TV*, *PC con touch screen*, *dispositivi mobili*, *smartphone* e *tablet*;
- ***gestione del percorso riabilitativo***: ***HEAD*** utilizza il *metodo di classificazione* ***ICF*** (***International Classification of Functioning***) per la profilazione dei pazienti e l'identificazione degli obiettivi terapeutici. Il sistema consente la pianificazione e l'erogazione della terapia oltre alla raccolta dei dati e dei risultati. La piattaforma offre esercizi standard per profilo di disabilità ma consente anche di realizzare esercizi *ad hoc* per il singolo paziente sfruttando algoritmi semantici per la ricerca e la presentazione dei contenuti;
- ***tecnologia sostenibile e accessibile***: il sistema presenta costi di utilizzo e gestione altamente competitivi rispetto all'approccio tradizionale. La terapia in teleconferenza consente di ridurre il costo socio-sanitario legato al trasporto del paziente dal proprio domicilio all'ospedale e il successivo ritorno a casa e contribuisce a ridurre il sovraffollamento dei centri di cura;
- ***esercizi modulari facilmente personalizzabili e adattabili alle singole esigenze di ogni singolo individuo***: la piattaforma ***HEAD*** offre strumenti per la raccolta di immagini, colonne sonore, programmi preferiti, foto, ricordi e filmati messi a disposizione dalla famiglia del paziente e per la ricerca di filmati di archivio attinenti e provenienti da varie fonti incluse gli archivi **Rai**. Questo materiale è usato per realizzare esercizi terapeutici estremamente mirati e di sicuro coinvolgimento per il soggetto;
- ***strumenti per la valutazione del paziente nel tempo (trend terapeutico, distanza tra miglioramento atteso e reale, grafici e tabelle)***: il sistema è in gado di:
  a) suggerire come variare il trattamento, analizzando le caratteristiche del paziente e i risultati degli esercizi;
  b) tener traccia del grado di soddisfazione del paziente e dei *caregiver* raccogliendo le loro valutazioni in termini di usabilità, soddisfazione per il servizio, interesse per gli esercizi proposti, miglioramenti percepiti a seguito delle terapie proposte;
  c) valutare sotto il profilo statistico l'andamento della terapia dei pazienti, realizzare grafici e report personalizzati in base ai dati presenti nel database e alle indicazioni dell'operatore.

Per saperne di più

Fondazione ASPHI: HEAD (*playlist YouTube*)

Fondazione ASPHI: *HEAD (Human Empowerment Aging and Disability): tecnologie e rete per tele-servizio di riabilitazione*

Mostra - convegno nazionale HANDImatica 2014: *HEAD (Human Empowerment Aging and Disability): tecnologie per un servizio di "tele-neuro-riabilitazione"* (convegno del 28 novembre 2014 - *video YouTube*)

Prix Italia 2013: *Dimostrazione in collegamento in tempo reale con i "Percorsi Riabilitativi" presso i Presidi Sanitari Villa Beretta (Costa Masnaga) e San Camillo (Torino)* (dimostarzione del 23 settembre 2013 - *video YouTube*)

A cura della Redazione

I Big Data al CRIT

Le tecnologie *Big Data* permettono oggi di elaborare grandi moli di dati non strutturati per estrarre informazioni, relazioni latenti, costruire modelli, e predire il funzionamento di sistemi complessi. Di natura multidisciplinare, gli approcci *Big Data* sono oggi applicati a diversi settori, dall' ICT al settore energetico, da studi epidemiologici allo studio di nuovi modelli economici.

In questo contesto, i ricercatori del CRIT *Luca Vignaroli* e *Claudio Schifanella* sono stati tra i relatori presenti al workshop *Big Data: Entering the black-box of research challenges, applications and business practices* tenutosi il 27 Aprile 2016 presso il *Politecnico di Torino* con la presentazione: "*La seconda vita dei programmi TV: analisi su social network e online media*".

Il workshop era rivolto a ricercatori, studenti, imprenditori interessati a capire che cosa sono i *Big Data*, offrendo sia aspetti tecnologici, sia esempi di applicazioni portati da aziende operanti in diversi settori. È stato discusso di come queste tecnologie stanno cambiando le filiere economiche, abilitando approcci innovativi nella gestione delle informazioni messe a disposizione dalle tecnologie ICT e le competenze di esperti dei vari settori, manager e studenti.

Sempre nell'ambito dei *Big Data*, gli stessi ricercatori hanno partecipato alla tavola rotonda della conferenza organizzata da *Dipartimento di Informatica dell'Università di Torino* dal titolo *FastData: A symposium on the challenges of Big Data (and beyond)* tenutasi il 21 marzo 2016. Il simposio è stato un'ottima occasione per il dialogo scientifico e lo scambio di conoscenze e nuove idee al massimo livello tecnico tra ricercatori, dottorandi e partner industriali per affrontare i temi relativi allo sfruttamento della attuale incredibile disponibilità di dati digitali, ai metodi per l'estrazione automatica di conoscenza, alle tecniche di analisi parallele e distribuite congiuntamente alla valutazione dei nuovi sviluppi e i più recenti risultati di ricerca sia nella comunità accademica che in quella industriale.

Il CRIT e l'E-Inclusion

Un filone di attività del CRIT riguarda lo studio e sviluppo di tecnologie rivolte alle persone con disabilità in linea con quanto previsto dal Contratto di Servizio RAI.

I progetti ***E-Inclusion*** attualmente in corso sono:

- **Stretch TV**: Il progetto prevede la realizzazione di una piattaforma che consente di migliorare la fruibilità dei programmi televisivi e radiofonici rallentandoli in modo da presentarli ad una velocità ottimale per le persone anziane e i soggetti con disabilità sensoriali/cognitive;

- **HEAD**: Il progetto, di durata triennale e finanziato dalla Fondazione Cariplo, si propone di realizzare esercizi di riabilitazione cognitiva per persone con esiti da ictus e traumi cerebrali, attingendo dal materiale delle Teche RAI in base allo specifico profilo del paziente.

- **Rai LIS**: Progetto rivolto alle persone sorde finalizzato a fornire delle traduzioni in lingua dei segni italiana mediante un attore virtuale. Sono stati realizzati quattro personaggi virtuali sviluppati adottando le ultime tecnologie di computer grafica e atterrando su innovative piattaforme di fruizione per il cliente finale

Nell'ambito della partnership del progetto **HEAD**, il 25 novembre 2015 su invito della *Fondazione Don Gnocchi Onlus*, il ricercatore del **CRIT** *Mauro Rossini*, ha presentato presso l'aula magna del presidio ospedaliero Don Gnocchi di Milano i progetti e-inclusion e le tecnologie per il sociale.

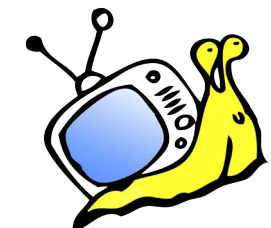
Il 22 aprile 2016 il ricercatore del **CRIT** *Andrea Del Principe*, su invito del *Politecnico di Torino*, ha tenuto una lezione nell'ambito del corso di laurea "*Tecnologie per la disabilità*", corso che intende formare futuri ingegneri consapevoli del ruolo fondamentale che le tecnologie hanno assunto quando si devono affrontare problemi legati alle condizioni di disabilità o dell'invecchiamento e del contributo che esse possono offrire per superare le difficoltà, quindi della necessità e del dovere di una progettazione che tenga sempre presenti anche le esigenze di queste categorie di persone.

Workshop e Test Panel sui servizi Stretch TV

Al CRIT si è tenuto il 10 febbraio un workshop di presentazione dei futuri servizi ***Stretch TV*** al quale sono intervenuti i rappresentanti della associazione **Rai Senior**.

Il progetto ***Stretch & Easy TV*** si propone di sviluppare una tecnologia per migliorare la fruibilità dei programmi televisivi rallentandoli in modo da presentarli ad una velocità ottimale alle persone con disabilità sensoriali/cognitive e agli anziani. I contenuti rallentati vengono realizzati in modo da incrementare l'intelligibilità e la qualità del parlato, mantenendo invariato il timbro della voce e garantendo la sincronizzazione con il segnale video di programma.

Il progetto nasce con l'obiettivo di essere adottato da **Rai** come arricchimento dell'offerta nell'ambito dei servizi per il sociale ed essere proposto ad altri broadcaster europei.

Questo potenziale futuro servizio potrebbe risultare estremamente utile anche ad una fascia sempre più estesa di popolazione estera che vive in Italia: un parlato più lento facilita la comprensione e lo studio della lingua italiana. Di riflesso, la medesima tecnologia applicata a contenuti televisivi con audio in lingua originale (ad esempio, 2° traccia audio in inglese) potrebbe essere di aiuto per chi volesse approfondire lo studio di una lingua straniera.

Nel corso della giornata dedicata alla presentazione della ***Stretch TV*** è stato illustrato il concept del progetto e, grazie alla collaborazione degli ex colleghi Rai, è stata realizzata una sessione di prove soggettive, per valutare l'aumento della comprensibilità dei programmi televisivi presentati con diversi coefficienti di rallentamento.

Progetto BRIDGET: 2nd review meeting

Il CRIT si è occupato anche quest'anno di organizzare ed ospitare la review annuale del progetto BRIDGET, tenutasi a Torino il 10 febbraio. In questa seconda review sono stati presentati in modo dettagliato ai revisori della Commissione Europea i lavori fatti durante il secondo anno di progetto, sia per quanto riguarda le parti legate agli avanzamenti tecnologici ottenuti dai partner del consorzio, sia per quanto riguarda gli aspetti gestionali e strategici, come l'utilizzo delle risorse, le aspettative di sfruttamento delle tecnologie e degli strumenti

sviluppati sul mercato e le attività messe in atto per pubblicizzare il progetto a livello europeo.

Durante la giornata non sono mancate parti dedicate alle dimostrazioni pratiche degli strumenti sviluppati nell'ambito di ***BRIDGET***, in particolare del *Professional Authoring Tool*, lo strumento di editing che permette di costruire programmi TV arricchiti per mezzo di *bridgets*, cioè collegamenti sincronizzati tra il contenuto principale e contenuti di approfondimento su second screen, e del *Player*, lo strumento che permette a chiunque sia dotato di un tablet o di uno smartphone e di una connessione Internet di fruire di programmi TV arricchiti per mezzo di *bridgets*.

I risultati della review sono stati positivi per il consorzio. I revisori, infatti, hanno apprezzato l'ottima collaborazione tra i partners rimanendo positivamente impressionati dalle dimostrazioni viste e dal livello di integrazione tra le varie componenti che è stato raggiunto nel secondo anno di attività del progetto. Allo stesso tempo hanno però rilevato alcuni aspetti critici su cui il consorzio dovrà lavorare ulteriormente nell'ultimo anno di attività, nell'ottica di massimizzare l'utilità e la qualità dei risultati finali del progetto. L'ultima review si terrà all'inizio del 2017 presumibilmente a Parigi.

Evoluzione delle Tecnologie Televisive

Il 24 maggio 2016 si è tenuto, presso il CRIT, un seminario organizzato dall'*Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino* con la collaborazione della *Commissione Manager* e valido per il riconoscimento dei Crediti Formativi Professionali ai partecipanti.

Durante il seminario, nel quale si è discusso dei progressi delle tecnologie televisive, l'*Ing. Gino Alberico* del **CRIT** ha presentato un ampio excursus di carattere tecnico che aveva in particolare come argomenti:

- l'evoluzione dei servizi broadcast
- l'evoluzione dei formati video
- l'UltraHD-4K e l'HDR-High Dynamic Range
- la SmartTV e l'OTT

Visite guidate al CRIT

Da ormai diversi anni è consuetudine del **CRIT** ospitare, su richiesta degli Istituti Superiori Italiani, visite guidate nelle quali gli studenti possono assistere alle dimostrazioni tecniche delle attività più salienti attualmente allo studio e confrontarsi ponendo i propri quesiti direttamente ai ricercatori.

Il 16 marzo e il 6 aprile sono state rispettivamente ospitate, nell'ambito di questa iniziativa di divulgazione tecnologica, alcune classi del *Liceo Scientifico Galilei-Ferrari* di Torino e dell'*Istituto Tecnico Pininfarina* di Moncalieri (TO).